



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

ENERGETISCHE OPTIMIERUNG VON BIOGAS - BHKW'S

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

Patrik Soltic, EMPA, Überlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf,
patrik.soltic@empa.ch, <http://www.empa.ch>

Daniel Edenhauser, EMPA, Überlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf,
daniel.edenhauser@empa.ch, <http://www.empa.ch>

Alexander Winkler, EMPA, Überlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf,
alexander.winkler@empa.ch, <http://www.empa.ch>

Impressum

Datum: **10.07.2008**

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm UAW Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Programmleiter F&E: Thomas Kopp tkopp@hsr.ch

BFE-Bereichsleiter: Andreas Eckmanns andreas.eckmanns@bfe.admin.ch

Projektnummer: 102'322

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch

Begleitgruppe (in alphabetischer Reihenfolge)

Bach, Christian, Empa Abt. Verbrennungsmotoren

Beyer, Christoph, Avesco AG Energiesysteme

Conti, Ettore, Conti & Associes Ingénieurs SA

Kopp, Thomas, Hochschule für Technik Rapperswil und Bundesamt für Energie

Rieder, Othmar, Avesco AG Energiesysteme

Schmid, Walter, Kompoegas AG

Weidenkaff, Anke, Empa Abt. Festkörperchemie und Katalyse

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich der Autoren dieses Berichtes verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Summary	6
1. Ausgangslage und Ziel der Arbeit	8
1.1 Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsberechnungen	11
1.1.1 Einspeisevergütung	11
1.1.2 Maximalkosten pro kW elektrischer Leistung	13
2. Möglichkeiten zur Steigerung der Exergieausbeute	14
2.1 Steigerung des verbrennungsmotorischen Wirkungsgrades	14
2.1.1 Wirkungsgradoptimale Verbrennung	14
2.1.2 SCR (Selective Catalytic Reduction) Abgasnachbehandlung	20
2.1.3 Chemische Alterung des Biogasanlagen-Katalysators	22
2.1.4 Wirkungsgradpotential bei getaktetem Volllastbetrieb gegenüber Teillastbetrieb 25	25
2.1.5 Wirkungsgradpotential bei Entdrosselung durch Ansaugluftvorwärmung	27
2.1.6 Modifikation der Ventilsteuerzeiten (Miller Zylus)	29
2.1.7 Wassereinspritzung	30
2.1.8 Abgasrückführung	31
2.1.9 Lambda=1 / Abgasrückführung	31
2.2 Möglichkeiten der exergetischen Abwärmenutzung	33
2.2.1 Stirlingprozess	33
2.2.2 Mehrphasenprozesse	33
2.2.3 Thermoelektrische Elemente	36
2.2.3.1 Thermoelektrische Elemente aktueller Bauart	38
2.2.3.2 Neue Generation thermoelektrischer Elemente	38
3. Wirtschaftlichkeitsabschätzung der einzelnen Systeme zur Abwärmenutzung	39
4. Diskussion und Schlussfolgerungen	41
Referenzen	43
Anhang	45

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung von mit unaufbereitetem Biogas betriebenen Wärme-Kraft-Kopplungs (WKK) Anlagen zu identifizieren und diese, wo möglich, bezüglich Energieausbeute und Kosten zu quantifizieren. Biogas WKK Anlagen bestehen aus einem Verbrennungsmotor sowie einem Generator, welcher die umgewandelte Leistung in das elektrische Netz speist. Solche Anlagen gewinnen, massgeblich getrieben durch die neu in Kraft getretenen kostendeckenden Einspeisevergütungstarife, aktuell an Bedeutung. Je nach angestrebter Amortisationsdauer, Kapitalkosten und Jahreslaufleistung ermöglichen die Einspeisevergütungstarife apparative Zusatzkosten (Anschaffung, Einbau, Wartung über den Abschreibungszeitraum) von bis etwa 10'000-20'000 CHF pro Kilowatt zusätzlich gewonnener elektrischer Leistung, was auch aufwändigere technische Lösungen ökonomisch interessant macht.

Biogas WKK Anlagen werden in der Regel, vom im Prozess vorgeschalteten Biogasanfall getrieben, stromgeführt gefahren. Typischerweise wird nur ein unbedeutender Anteil der Wärme genutzt.

Die wirkungsgradsteigernden Massnahmen wurden in zwei Klassen gegliedert und untersucht:

1. Steigerung des verbrennungsmotorischen Wirkungsgrades,
2. Umwandlung der normalerweise ungenutzten Abwärme aus dem Motorkühlkreislauf sowie aus dem Abgas in elektrische Energie durch zusätzliche technische Systeme.

Anders als Kraftwerke, arbeiten stromgeführte Biogas WKK Anlagen häufig im wirkungsgradungünstigeren Teillastbetrieb. Es ist demnach einerseits wichtig, den Anlagenwirkungsgrad im Nennleistungspunkt mittels der oben genannten Klassen zu verbessern und andererseits dafür zu sorgen, dass der Teillastwirkungsgrad nicht zu stark abfällt.

1. Steigerung des verbrennungsmotorischen Wirkungsgrades

Um einen hohen Wirkungsgrad des Ottomotors zu erreichen, sollte dieser mit etwa 20% Luftüberschuss betrieben werden (man spricht von Lambda = 1.2). Leider führt dieses wirkungsgradoptimale Gas-zu-Luft Verhältnis zu hohen Stickoxyd (NO_x) Emissionen. Die NO_x Grenzwerte werden typischerweise eingehalten, indem man um die Spitzentemperaturen der Verbrennung zu senken ein deutlich magereres Gemisch fährt (typischerweise über 50% Luftüberschuss), womit man etwa 3% der möglichen Stromproduktion "verschenkt". Im Bericht sind folgende Methoden beschrieben, welche das Potenzial einer Wirkungsgradsteigerung bei gleichzeitiger Einhaltung der Emissionsgrenzwerte haben:

- Wirkungsgradoptimale Verbrennung ohne Rücksicht auf die NO_x Emissionen, nachgeschaltete NO_x Minderung mittels einer Abgasnachbehandlung (selektive katalytische Reduktion),
- Kältere Prozessführung durch den Einsatz des sogenannten Miller Prozesses (d.h. Anpassung der Ventilsteuerung, des Verdichtungsverhältnisses und der Aufladung),
- Kältere Prozessführung durch Wassereinspritzung,
- Senkung des Sauerstoffpartialdruckes im Brennraum mittels Abgasrückführung,
- Verbrennung bei $\text{Lambda}=1$ bei gleichzeitiger Abgasrückführung und Einsatz von Drei-Wege-Katalyse.

Die Quantifizierung dieser Massnahmen bzgl. Kosten und Nutzen ist für Biogasbetrieb nicht eindeutig möglich, in der Literatur sind keine für Biogas belastbaren Daten zu finden. Auf diesem Gebiet sind weiterführende Arbeiten anzustreben.

Um die Verluste bei tiefem Gasanfall zu minimieren wurde einerseits untersucht, die Anlagen bei Vollast getaktet anstatt im Teillastbetrieb gedrosselt zu betreiben und andererseits den Teillastwirkungsgrad zu verbessern. Als teillastverbessernde Massnahmen stellen die Entdrosselung durch Ansaugluftvorwärmung, durch Abgasrückführung sowie durch Verringerung des nutzbaren Hubraumes (mit entsprechender Anhebung des Aufladegrades für den Nennlastfall) mittels Miller Prozess vielversprechende Ansätze dar. Auch hier ist die Quantifizierung Kosten/Nutzen für Biogas mittels Literatursuche nicht eindeutig machbar, weiterführende numerische/experimentelle Arbeiten wären notwendig.

Da die durch die Einspeisevergütungstarife ökonomisch verfügbaren Investitionssummen recht hoch sind würden sich die für die Wirkungsgradsteigerung vorgeschlagenen Massnahmen rasch rechnen.

2. Umwandlung der Abwärme in Strom

Bei Verbrennungsmotoren fallen nennenswerte Abwärmemengen im Nennlastbetrieb bei rund 450-600 °C im Abgas (je nach Brennverfahren und Distanz zum Turbolader) und bei rund 80-90 °C im Kühlwasser an. Jeder dieser Wärmeströme ist etwa gleich gross wie die verfügbare mechanische Leistung. Es lohnt sich also, je nach Investitions- und Wartungsaufwand, diese beträchtlichen Wärmeströme teilweise in Exergie umzuwandeln, auch wenn der Wirkungsgrad der Wandlung tief sein sollte. Als mögliche Wandler wurden Dampfprozesse (sogenannte ORC Systeme), Stirlingmotoren und thermoelektrische Wandler betrachtet.

- Unmittelbar umsetzbar sind ORC Systeme, welche den Wärmestrom im Abgas nutzen. Solche Anlagen sind zwar recht teuer, lassen sich aber gut amortisieren. Zudem ist diese Technologie bekannt und mit wenig Risiken verbunden.
- Stirlingmotoren sind für die betrachtete Anwendung nicht gut geeignet. Ihr Problem sind die hohen Systemkosten sowie die recht hohe Reibung, welche einerseits einen hohen Wartungsaufwand verursacht und andererseits den Wirkungsgrad für das hier betrachtete Abgas-temperaturniveau auf ein sehr tiefes Niveau drückt.
- Bei den thermoelektrischen Wandlern, welche den Seebeck-Effekte ausnutzen, wird ein Wärmestrom (Carnot-limitiert) direkt in einen elektrischen Strom gewandelt. Ihre Wirkungsgrade sind nicht sehr hoch, dafür sind sie weitgehend wartungsfrei. Es sind zwei verschiedene Ansätze zu unterscheiden:
 - Herkömmliche thermoelektrische Wandler basieren auf Telluriden, welche giftig und nur bis etwa 250 °C temperaturfest sind. Solche Wandler werden großtechnisch hergestellt, sind recht teuer und im Kühlwasserkreis direkt einsetzbar. Im Abgasstrang sind solche Wandler zwar auch einsetzbar, sie müssen aber so verbaut werden, dass ihre heiße Seite nicht wärmer als 250 °C wird.
 - Es laufen vielversprechende Forschungsarbeiten auf dem Gebiet alternativer thermoelektrischer Materialien, welche nicht giftig, verträglich mit hohen Abgastemperaturen und deutlich kostengünstiger als die herkömmlichen sind. Dieser Pfad ist im Auge zu behalten, neuartige thermoelektrische Wandler könnten in absehbarer Zukunft eine gute Möglichkeit für den Einsatz in WKK Anlagen werden.

Summary

The aim of this work was to identify and quantify the possibilities to increase the efficiency of combined-heat-and-power (CHP) plants running on biogas. Typical biogas CHP plants consist of an internal combustion engine and a generator which supplies to the electric grid. These CHP plants gain on importance because of Switzerland's recently adopted increased reimbursement tariffs. Additional costs around CHF 10'000-20'000 per kW of power that is additionally recovered can be economically interesting, depending on the intended period of amortisation, the plant's yearly operating hours, and the interest rates.

Biogas CHP plants are normally driven by the biogas production of the upstream fermenter process. Usually, the produced heat is used only to a marginal extent.

The measures to increase the process efficiency were divided into two classes:

1. Increase of the internal combustion engine's efficiency,
2. Conversion of the unused heat from engine cooling and exhaust into useful electrical energy using additional technical components.

In contrast to conventional power plants, biogas CHP plants are operated quite often in low efficiency part load conditions. It is therefore important to enhance the plants' nominal efficiency using the measures mentioned above and to make sure that the part load efficiency drops as little as possible.

1. Increase of the internal combustion engine's efficiency

A spark ignited engine shows best efficiency when it is operated with an air excess of around 20% (technical term: Lambda = 1.2). Unfortunately, this efficiency-optimal stoichiometry setting leads to high nitrogen oxide (NO_x) emissions. NO_x limits are typically met by engine operation with higher air excess which leads to the "waste" of about 3% electrical energy production. This report describes the following methods which can increase the efficiency and fulfil the pollutant emission limits:

- Efficiency-optimal combustion without considering NO_x emissions plus downstream NO_x removal using exhaust gas aftertreatment (selective catalytic reduction),
- Cooler combustion using the so-called Miller process,
- Cooler combustion using water injection,
- Lowering the oxygen partial pressure in the combustion chamber using exhaust gas recirculation,
- Lambda=1 combustion with simultaneous exhaust gas recirculation and three-way-catalysis.

Cycled full-load operation of the COP plant instead of continuous part load operation was investigated in order to minimise the losses for situations with low biogas production. Alternatively, measures were investigated to increase the part load efficiencies. Promising approaches are intake air pre-heating, exhaust gas recirculation and valve timing modifications (so-called Miller cycle).

The quantification of these methods regarding costs and benefits for biogas cannot be done clearly; the open literature does not provide distinct figures. Continuative work should be performed on this topic.

2. Conversion of unused heat into useful electrical energy

Internal combustion engines operated at their rated output produce waste heat at a temperature level of around 450-600 °C in the exhaust (depending on the combustion process and on the distance to the turbocharger) and at around 80-90 °C in the cooling circuit. Each of these heat fluxes has the same order of magnitude as the engine's mechanical power. It is worth, depending on the effort for investment and servicing, to convert these respectable heat fluxes into exergy - even if the conversion efficiency should be rather poor. Steam processes (so-called ORC systems), Stirling engines and thermoelectric materials were considered as potential converters.

- Exhaust-gas driven ORC systems are immediately available. Such systems are comparably expensive but can be amortised well. Furthermore, the technology is well-known, the risks are comparably small.
- Stirling engines are not well suited for the application regarded here. Their problems are the high costs and the comparably high friction which leads to high surviving costs and low efficiencies for the temperature levels considered.
- Thermoelectric converters take advantage of the so-called Seebeck effect and convert a heat flux directly (Carnot efficiency limited) into an electric current. Typical efficiencies are not very high but they do not need any regular servicing. Two different types of thermoelectric converters have to be regarded:
 - Classical converters which are based on tellurides. Such mass-produced devices are toxic and stable to only about 250 °C. They can directly be used in the engine's cooling circuit. If they are used in the exhaust gas system, the upper temperature limit has to be considered.
 - Promising research on alternative thermoelectric material is ongoing. Such alternative converter material is non-toxic, stable at high temperatures and cheaper than the classical tellurides. This path has to be kept in view; new thermoelectric converters could be a good alternative for waste-heat recovery in CHP plants in the near future.

1. Ausgangslage und Ziel der Arbeit

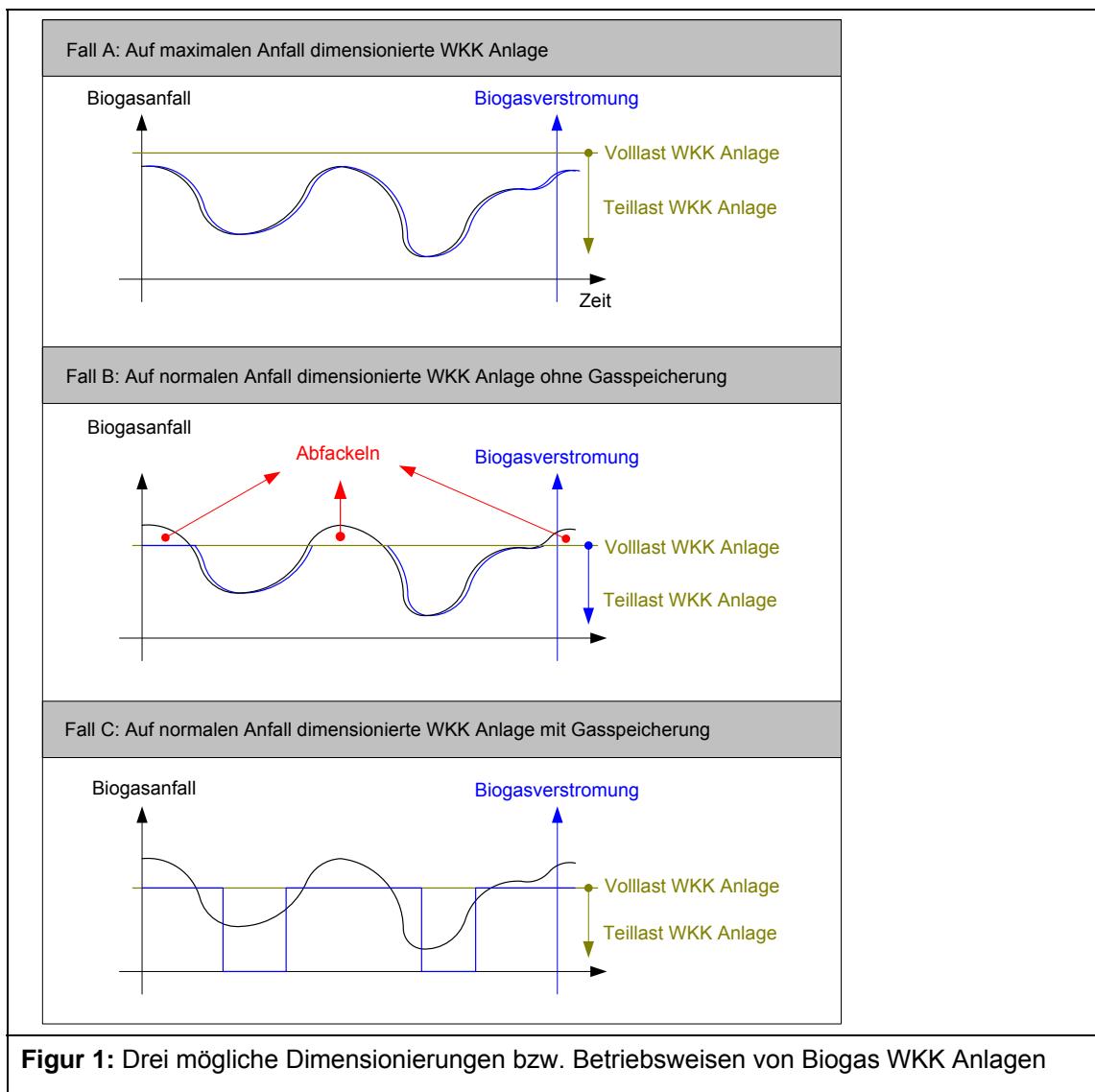
Viele diskutierten oder sich bereits in Umsetzung befindlichen Energiesparmassnahmen führen zu einer Änderungen des Strommixes zugunsten des Stromverbrauches (z.B. Elektro-Wärmepumpen statt mit fossilen Brennstoffen betriebene Heizgeräte, Elektrofahrzeuge oder "Plug-in" Hybridfahrzeuge, etc.). Je nach Art der Stromerzeugung kann die dadurch erfolgreich gesteigerte Endeffizienz ungewollt zu höheren Treibhausgasemissionen führen, wenn z.B. bei einer Grenzstrombetrachtung die im Inland steigende Elektrizitätsnachfrage zu vermehrtem Einsatz von Kohlekraftwerken im Ausland führen würde. Es ist demnach (selbstverständlich neben allen mit dem BfE Aktionsplan "Energieeffizienz" initiierten Stromsparmassnahmen) wichtig, soweit wie möglich "saubere" Elektrizität bereitzustellen. Hier kann die dezentrale Stromproduktion aus biogenen Abfallstoffen einen Beitrag leisten. Gemäss [Oettli] haben in der Schweiz alle Biomassekategorien der landwirtschaftlichen Produktion das grösste Zuwachspotenzial, das ökologisch nutzbare Potenzial liegt bei etwa 20 PJ Primärenergie pro Jahr bei Ernterückständen, Gülle und Mist. Der Stromverbrauch der Schweiz liegt bei momentan etwa 200 PJ pro Jahr (2007: 57.8 Milliarden kWh). Dezentrale Biogas-WKK Anlagen sind also in der Lage, in der Schweiz im Prozentbereich zur Stromerzeugung beizutragen. Ungeachtet des vergleichsweise kleinen Potenzials bringt eine dezentrale Produktion in Biogas-WKK Anlagen Vorteile wie z.B. lokale Wertschöpfung in kleinen und mittleren Unternehmen, Erhöhung der Versorgungssicherheit und eine Diversifikation im Strommarkt mit sich. Selbstverständlich sind die Stromgestehungskosten in solchen verteilten Klein- bzw. Kleinstanlagen deutlich höher als bei Grossanlagen. Die neuen Einspeisevergütungstarife (vgl. Abschnitt 1.1.1.) tragen dieser Tatsache Rechnung. In Konkurrenz zur dezentralen Verstromung von Biogas steht die Ko-Verbrennung (Beimischung von Biogas zu fossilem Erdgas) in sehr effizienten grossen Gas-Kombikraftwerken, wo Wirkungsgrade im Bereich von 60% heute machbar sind. Diese Arbeit beschäftigt sich ausschliesslich mit der dezentralen Stromproduktion in kleineren WKK Anlagen und blendet den Weg der Ko-Verbrennung aus.

Fossil betriebene Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlagen (WKK-Anlagen) werden in der Regel wärmegeführt betrieben, die Wärme wird genutzt. Im Gegensatz dazu werden Biogas WKK-Anlagen, getrieben durch den Biogasanfall, meist stromgeführt gefahren. Ein Grossteil der Wärme bleibt ungenutzt. Abhängig von der erzielbaren Einspeisevergütung kann es wirtschaftlich sinnvoll sein, einen Teil dieser "Abfallwärme" mittels nachgeschalteter technischer Anlagen in Strom zu wandeln bzw. durch aufwendigere Motorentechnologie den elektrischen Wirkungsgrad der Anlage direkt zu steigern. Aus Gründen der Energieeffizienz ist eine solche Wirkungsgradsteigerung natürlich ebenfalls sehr begrüssenswert.

Eine besondere Betrachtung erfordert die Betriebsweise solcher Anlagen. Figur 1 zeigt drei Möglichkeiten der Dimensionierung und des Betriebes für einen hypothetischen Verlauf des Biogasanfalles:

- Fall A. Die WKK Anlage wird so dimensioniert, dass sie den maximal möglichen Biogasanfall abnehmen und verstromen kann. Eine solche WKK Anlage wird potenziell oft im tieferen Teillastbereich betrieben, der Teillastwirkungsrad ist sehr wichtig.
- Fall B. Die WKK Anlage wird so dimensioniert, dass sie den grössten Teil des Biogasanfalles abnehmen und verstromen kann. Überschüssiges Gas wird abgefackelt. Eine solche WKK Anlage wird oft im höheren Teillastbereich betrieben, der "obere" Teillastwirkungsgrad ist wichtig.
- Fall C. Die WKK Anlage wird auf normalen Biogasanfall dimensioniert. Ein Gaszwischenspeicher sorgt dafür, dass der Anfall nicht zeitgleich verstromt werden muss. Die WKK Anlage läuft entweder bei Nennlast oder wird abgestellt (Taktbetrieb). Der Teillastwirkungsgrad ist irrelevant. Es kann notwendig sein, die WKK Anlage nicht ganz abzustellen um die Abwärme für den Gaserzeugungsprozess oder für andere Wärmeabnehmer zur Ver-

fügung zu stellen. In diesem Fall müssen sehr kurze Taktzeiten bzw. Wärmespeicher eingeführt werden, um einen Teillastbetrieb zu vermeiden.



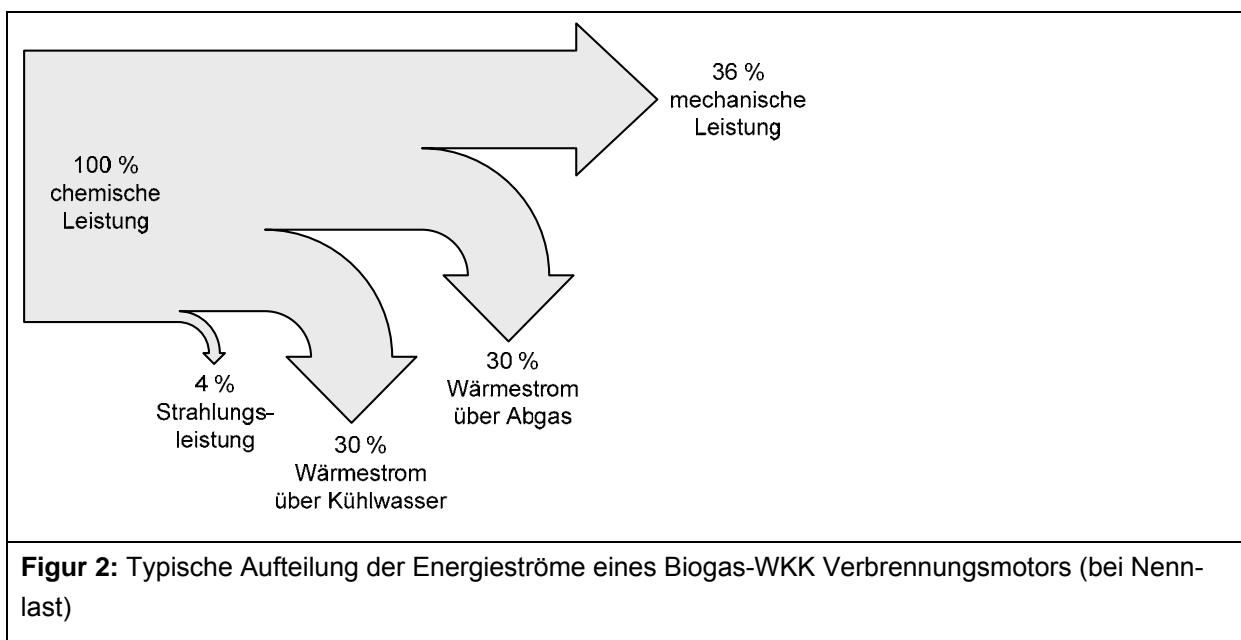
Technisch besteht eine Biogas-WKK Anlagen typischerweise aus einem Verbrennungsmotor, welcher direkt an eine Synchronmaschine (Generator) gekoppelt ist um demnach mit einer fixen Drehzahl läuft. Bei Brennstoffen mit schlechter oder sehr schwankender Qualität kommen auch Mikroturbinenanlagen zum Einsatz, diese liefern aber gegenüber einem verbrennungsmotorischen System deutlich tiefere elektrische Wirkungsgrade, ihr Einsatz ohne Wärmenutzung ist wirtschaftlich nicht vertretbar.

Verbrennungsmotorische WKK-Anlagen an elektrischen Netzen mit 50 Hz Frequenz laufen typischerweise mit einer Drehzahl von 1'500 U/min (Synchronmaschine mit zwei Polpaaren), bei kleineren Motoren ist der Einsatz einer Synchronmaschine mit einem Polpaar bei einer Drehzahl von 3'000 U/min sinnvoll. Da die Drehzahl jeweils konstant ist, kann die Leistung nur über das Drehmoment des Verbrennungsmotors verändert werden. Als Verbrennungsmotor im Biogas-Einsatz kommen drei verschiedene Konzepte in Frage:

- Stöchiometrisch laufender Ottomotor
- Mager laufender Ottomotor, Zündung mittels Zündkerze
- Mager laufender Zündstrahlmotor, Zündung über einen Diesel- oder Dieselsatz-Zündstrahl

Aus Gründen des Wirkungsgrades und der kritischeren Abgasnachbehandlung kommen konventionell stöchiometrisch betriebene Ottomotoren für den Biogaseinsatz nicht zum Einsatz. Eine gute Möglichkeit ist der Betrieb bei $\lambda=1$ mit möglichst hoher Abgasrückführrate und 3-Wege-Katalyse, was für Erdgas sowie für Biogas (mit Gasaufbereitung) erfolgreich gemacht wird. Mit solchen Konzepten lassen sich gute Wirkungsgrade bei gleichzeitig tiefer Schadstoffemissionen realisieren, allerdings muss ein "sauberes Gas" garantiert werden (d.h. Schwefel, Silizium und weitere Spuren elemente müssen entfernt werden). Zündstrahlmotoren haben den Vorteil, selbst sehr mageres Gas von schlechter Qualität (d.h. einem hohen Anteil an inerten Gasen) zünden zu können. Ihr Nachteil ist der zusätzlich notwendige Betriebsstoff, die problematischen NO_x , CO und Partikelemissionen, der Einsatz eines potenziell fossilen zweiten Betriebsstoffes sowie oftmals vorhandene Lebensdauerprobleme. Für die Verstromung von Biogas, was typischerweise auf grösseren Landwirtschaftsbetrieben geschieht, haben sich turboaufgeladene, mager laufende Ottomotoren durchgesetzt. Solche mager betriebene, turboaufgeladene Motoren werden technisch idR. von Dieselmotoren abgeleitet.

Da die Effizienz der Energiewandlung in Verbrennungsmotoren durch den 2. Hauptsatz der Thermodynamik limitiert ist sowie Reibung überwunden werden muss, fällt bei allen beschriebenen Motorkonzepten der grössere Teil der dem Motor zur Verfügung gestellten chemischen Energie in Form von Wärme an. Die Energieströme für einen typischen WKK-Motor eines grossen Landwirtschaftsbetriebes (100 kW Bereich) unter Nennlast teilen sich in etwa wie in Figur 2 dargestellt auf. Grössere Gasmotoren erreichen höhere Wirkungsgrade (1 MW: ca. 40%), kleinere entsprechend tiefere.



Die Kühlwasseraustrittstemperaturen sind über den Motorthermostat geregelt und bewegen sich im Bereich von 80-90 °C. Stöchiometrisch betriebene Motoren mit inertgasfreiem Kraftstoff erreichen Abgastemperaturen direkt nach Auslassventilen von um die 1'000 °C. Im Fall von mager betriebenen turboaufgeladenen Biogasmotoren liegen die Abgastemperaturen nach Turbine typischerweise im Bereich von 450-600 °C. Bei turboaufgeladenen Motoren wird ein Teil der Abgasenthalpie zur Verdichtung der Frischluft verwendet und die Frischluft wird nach dem Verdichter zur Dichteerhöhung gekühlt. Die Turboaufladung reduziert also den Abgaswärmestrom (hohes Temperaturniveau) und verursacht einen neuen Wärmestrom bei der Ladeluftkühlung (tieferes Temperaturniveau). Die Temperatur der Ladeluft nach Verdichter ist, je nach Aufladungsauslegung und Verdichterwirkungsgrad auf einem Temperaturniveau von einigen zehn bis über 200 °C.

Es stellt sich also die Frage, wie die elektrische Ausbeute solcher Biogas-WKK Anlagen

- durch Erhöhung des motorischen Wirkungsgrades ohne negative Beeinflussung der Schadstoffemissionen,
- durch eine Nachverstromung des Kühlwasserwärmestromes
- durch eine Nachverstromung des Abgaswärmestromes
- oder durch eine intelligente Dimensionierung bzw. Nutzung

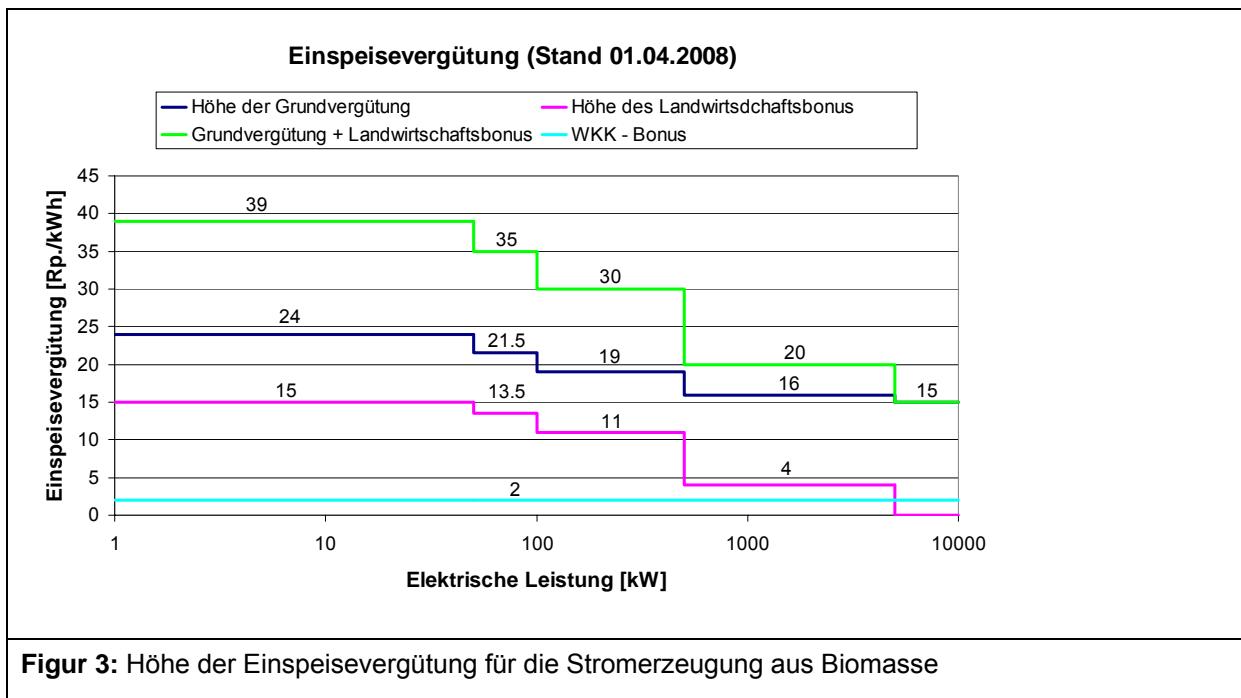
gesteigert werden kann. Kapitel 2 befasst sich mit verschiedenen technischen Pfaden. Neben den technischen Möglichkeiten interessiert auch deren Wirtschaftlichkeit, speziell unter Berücksichtigung der aktuellen Einspeisevergütung. Dies wird im Kapitel 3 behandelt.

1.1 Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Als Grundlage aller folgenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen dient die aktuelle bzw. neue Stromversorgungsverordnung [StromVV] vom 01.04.2008 für die Stromerzeugung aus Biomasse, welche nachfolgend kurz dargestellt werden soll.

1.1.1 Einspeisevergütung

In der Figur 3 sind die, in der Stromversorgungsverordnung angegebenen Tarife für die Stromerzeugung aus Biomasse dargestellt. Die Höhe der Vergütung setzt sich aus drei teilweise optionalen Teilen zusammen und ist abhängig von den Rohstoffen bzw. Reststoffen die zur Stromerzeugung genutzt werden und der Menge die an Wärmeenergie genutzt wird (WKK – Bonus). Die Erklärung ab wann der WKK – Bonus gewährt wird, ist im weiteren Verlauf dieses Kapitels enthalten. Die Amortisations- und Vergütungsdauer beträgt 20 Jahre. Die jährliche Absenkung liegt bei 0%.

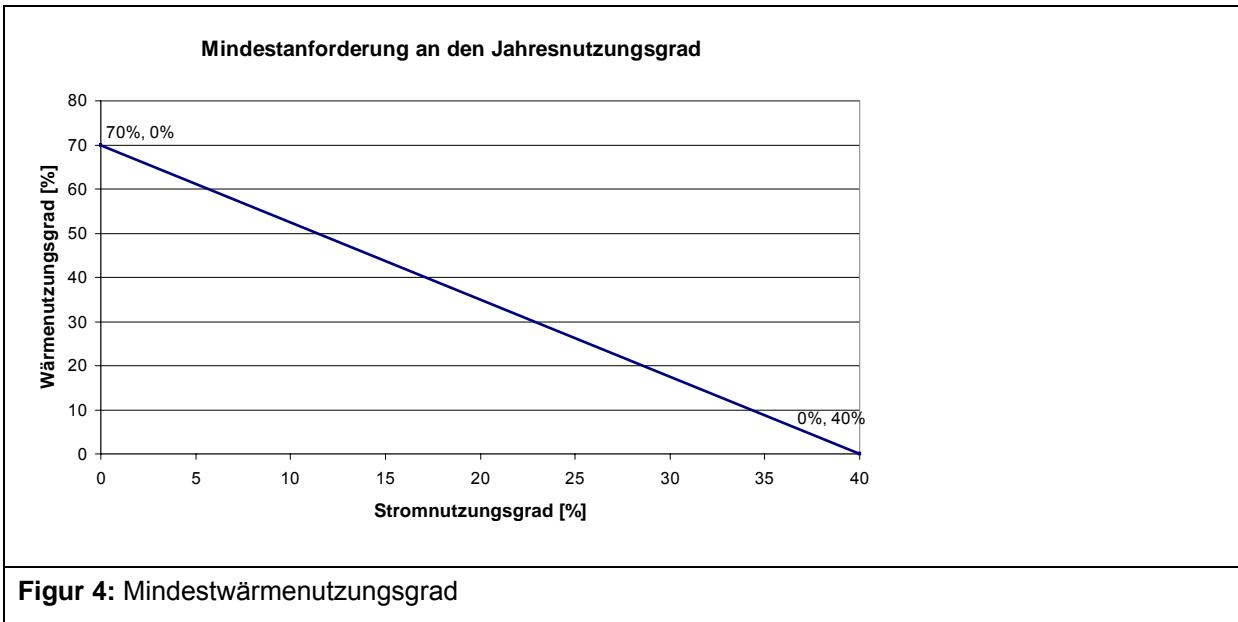


Als weitere Einteilung ist die Höhe der Vergütung in Leistungskategorien eingeteilt, die der Tabelle 1 entnommen werden können. Die Angaben beziehen sich nicht auf die Nennleistung der WKK – Anlage, sondern sind bezogen auf die tatsächlich produzierte Strommenge pro Jahr (Produzierte Strommenge [kWh]/(360 * 24h)).

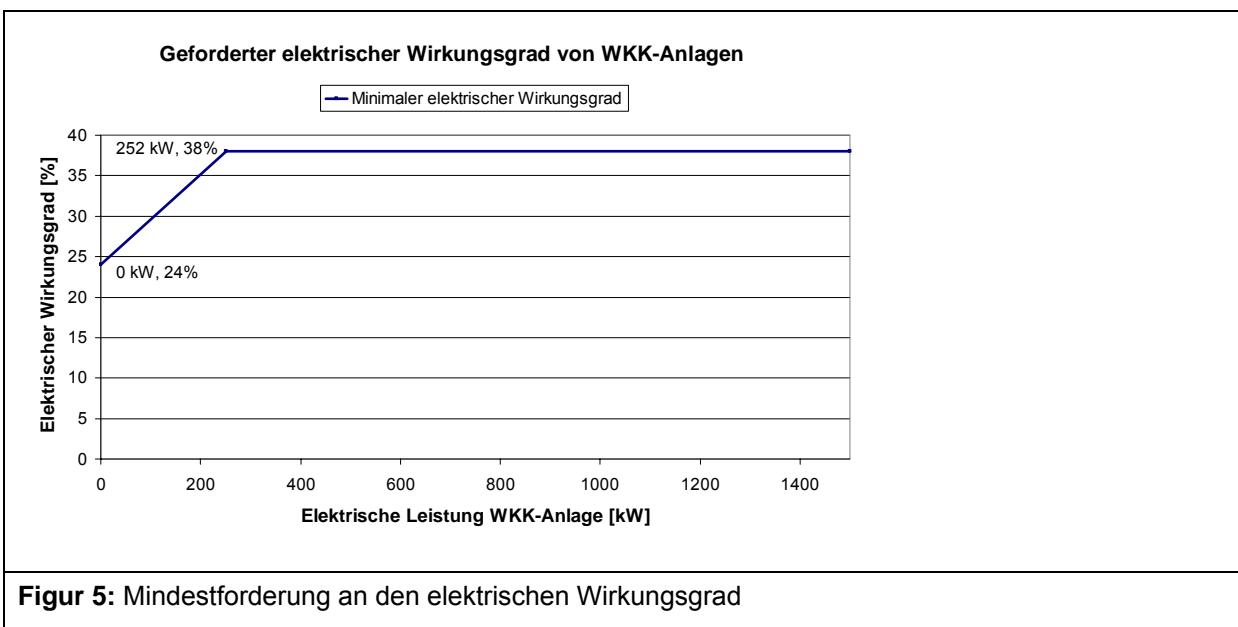
Leistungsklasse [kW]
≤ 50
≤ 100
≤ 500
≤ 5000
> 5000

Tabelle 1: Leistungsklassen der Einspeisevergütung

Der bereits oben erwähnte WKK – Bonus wird gewährt sobald der Mindestwärmevernutzungsgrad (Figur 4) um mindestens 20% überschritten wird. Hiermit soll ein weiter Anreiz dazu gegeben werden möglichst effizient die vorhandene Abwärme einer WKK – Anlage z.B. als Fernwärmekette zu nutzen.



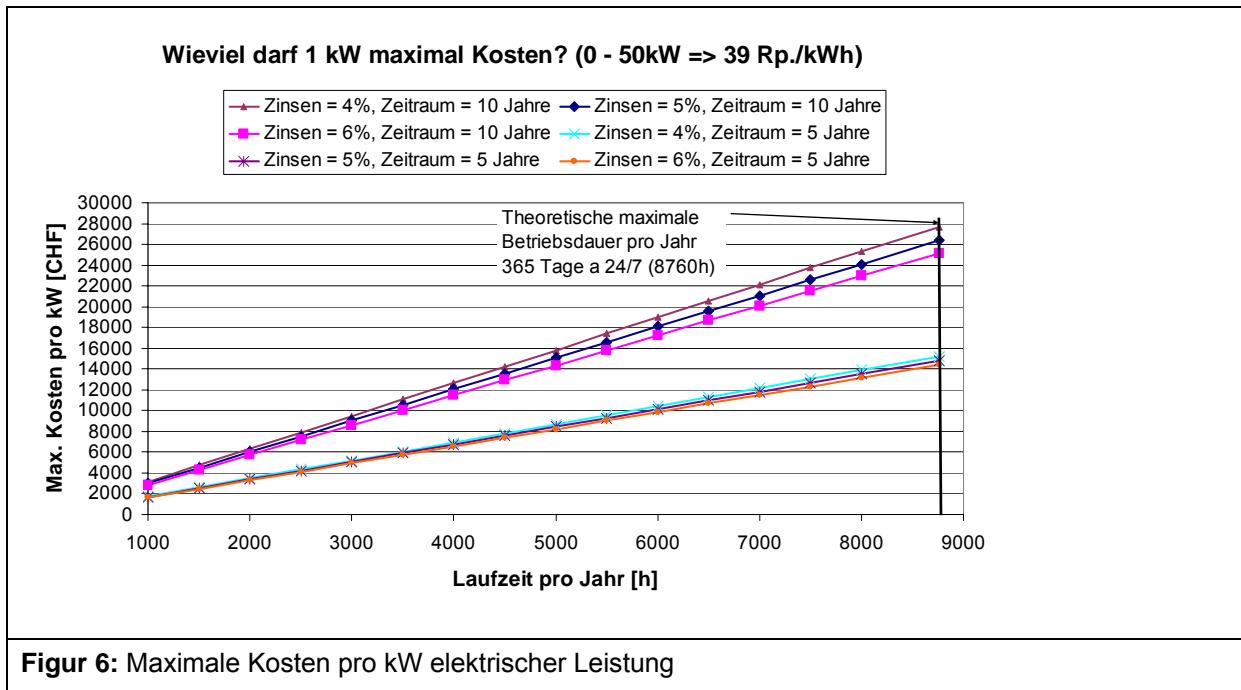
In der Figur 5 ist der elektrische Mindestwirkungsgrad dargestellt der gemäss der Stromversorgungsverordnung vorgeschrieben ist. Ab einer elektrischen Leistung von 252 kW ist ein auf Herstellerangaben beruhender Wirkungsgrad von 38% vorgeschrieben.



Weitere Details zur Einspeisevergütung können der Stromversorgungsverordnung entnommen werden.

1.1.2 Maximalkosten pro kW elektrischer Leistung

In Abhängigkeit der Werte, die anhand der Einspeisevergütung ermittelt wurden, kann man berechnen welche Kosten pro kW elektrische Leistung wirtschaftlich tragbar sind. In der Figur 6 ist beispielhaft für eine Einspeisevergütung von 39 Rp./kWh und verschiedene Abschreibungszeiträume inkl. verschiedener Zinssätze dargestellt welche maximale Investitionssumme wirtschaftlich sinnvoll ist. Die hieraus abzulesenden Zahlenwerte verstehen sich inkl. aller Wartungs- und Nebenkosten pro kW, die über den Abschreibungszeitraum entstehen.



Je nach Jahreslaufleistung einer WKK – Anlage ergeben sich hieraus durchaus ansehnliche Zahlenwerte. So ist z.B. ab einer Laufleistung von 4500 h/Jahr und einem Abschreibungszeitraum von 10 Jahren ein Betrag von ca. 13500.- CHF pro Kilowatt elektrischer Leistung wirtschaftlich sinnvoll.

Dem Anhang dieses Berichts kann der Berechnungsweg entnommen werden. Weiterhin ist im Anhang das Diagramm (Figur 6) für alle anderen Leistungskategorien bzw. Einspeisevergütungen vorhanden.

2. Möglichkeiten zur Steigerung der Exergieausbeute

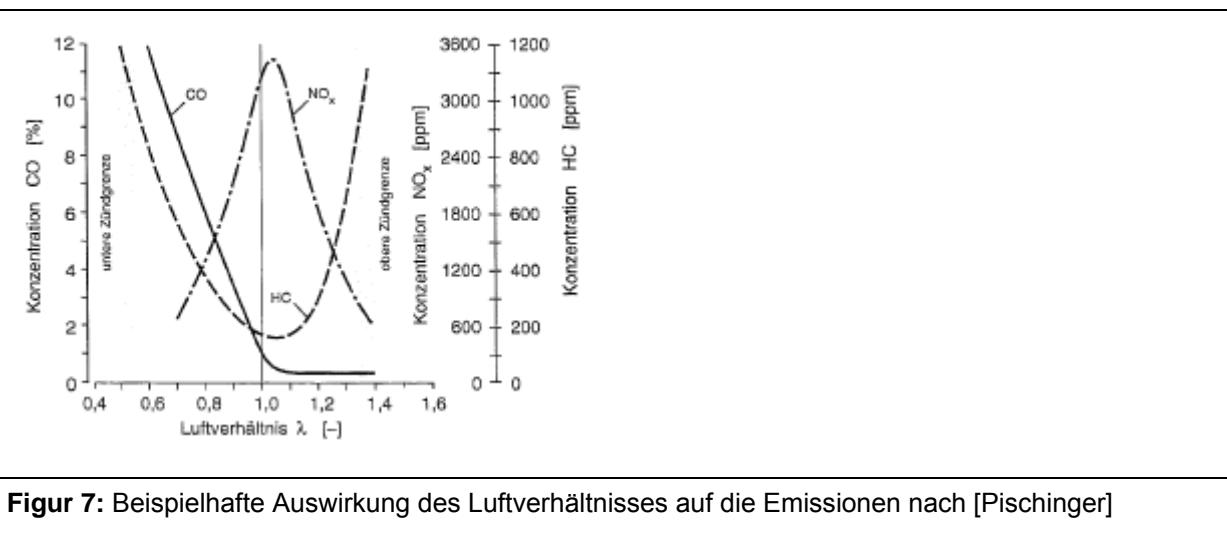
In diesem Kapitel werden technische Möglichkeiten behandelt, um einen höheren Anteil der im Verbrennungsmotor freigesetzten Wärme mechanisch bzw. elektrisch nutzbar zu machen. Dies kann direkt geschehen, indem der Wirkungsgrad des verbrennungsmotorischen Prozesses verbessert wird. Darauf wird im Abschnitt 2.1 eingegangen. Dies kann aber auch indirekt geschehen, indem ein Teil der normalerweise nicht genutzten Wärmeströme mittels zusätzlicher technischer Systeme in mechanische oder direkt in elektrische Energie gewandelt wird. Darauf wird in Abschnitt 2.2 eingegangen.

2.1 Steigerung des verbrennungsmotorischen Wirkungsgrades

Aktuell werden Biogas BHKW's aufgrund der vorgeschriebenen NO_x Emissionsgrenzwerte von 400 mg/Nm³ [LRV] sehr mager ($\lambda > 1.5$) und damit nicht wirkungsgradoptimal betrieben. Um das Potenzial einer wirkungsgradoptimalen Verbrennung abzuschätzen wurden an einem Biogas-BHKW mit echtem Biogas sowie an einem PKW Erdgasmotor mit reinem Methan Versuche durchgeführt. Hierbei wurden verschiedene Zündzeitpunkte und Gemischvariationen getestet und vermessen. Der Messaufbau für die Messung an einem Biogas-BHKW ist der Figur 9 zu entnehmen.

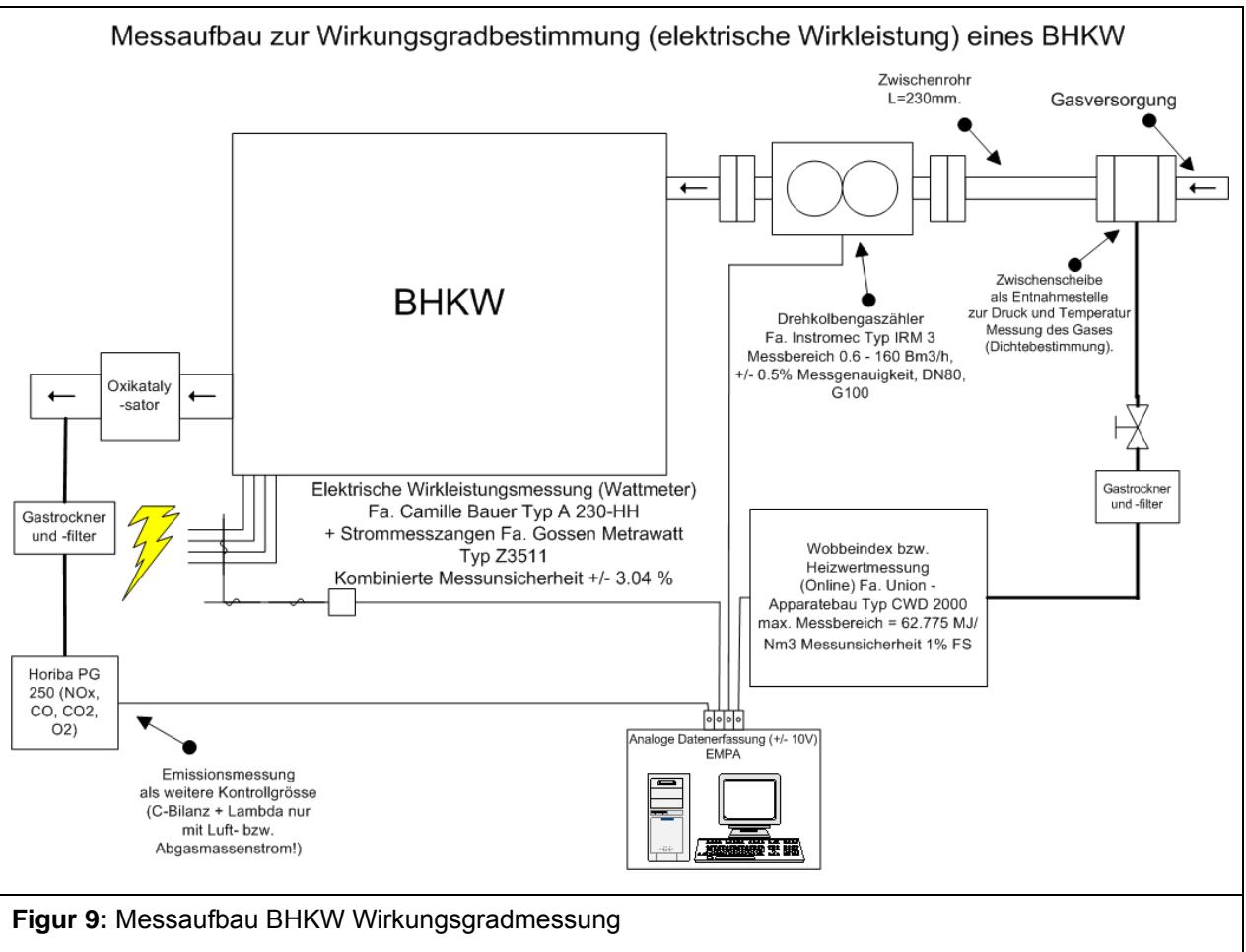
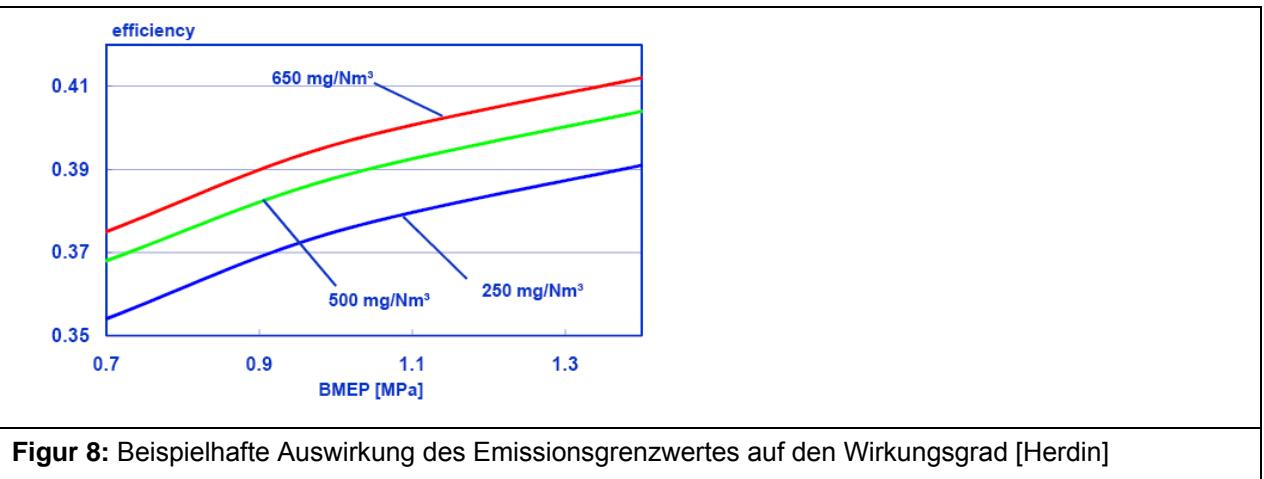
2.1.1 Wirkungsgradoptimale Verbrennung

Der thermodynamische Wirkungsgrad hängt stark von der Temperatur der Wärmezufuhr sowie von der Schnelligkeit der Verbrennung ab. Den höchsten Wirkungsgrad eines methanbetriebenen Verbrennungsmotors erhält man typischerweise im Gemischausbereich $\lambda = 1.10 - 1.20$ [van Basshuysen] mit Umsatzschwerpunkt (d.h. 50% des Gemisches sind verbrannt) kurz nach oberer Totpunktage des Kolbens.

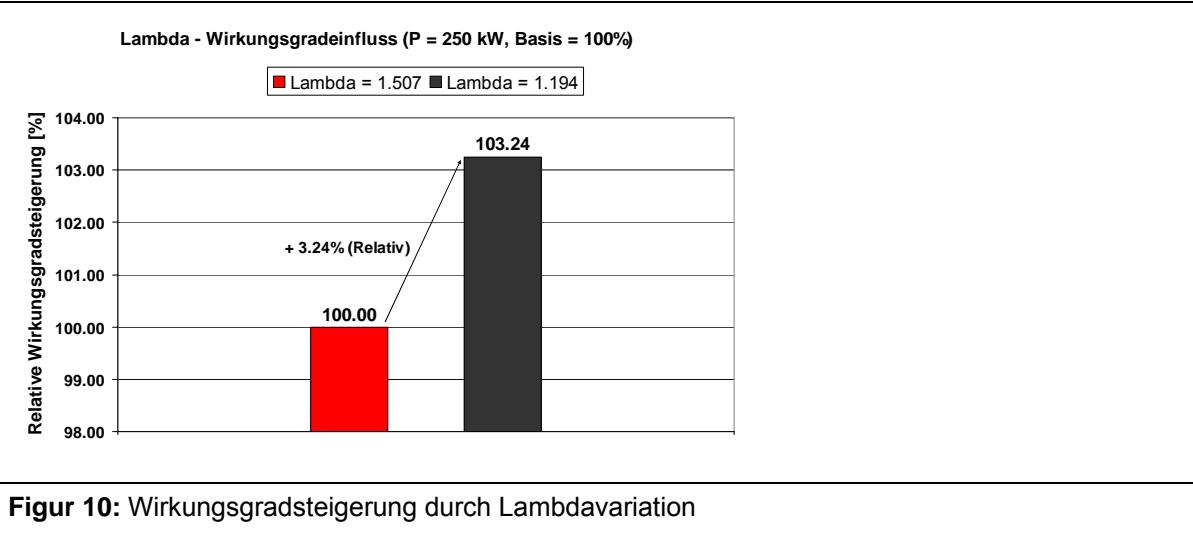


Figur 7: Beispielhafte Auswirkung des Luftverhältnisses auf die Emissionen nach [Pischinger]

Durch die hohen Spitzentemperaturen, welche in diesem Gemischausbereich auftreten, steigen allerdings auch die thermisch aus dem Luftstickstoff gebildeten NO_x Emission sehr stark an. Dieses Verhalten ist in Figur 7 beispielhaft dargestellt. Das Diagramm bezieht sich auf die ottomotorische Verbrennung mit Benzin, ist in ähnlicher Form aber auch für die Verbrennung von anderen Kohlenwasserstoffgemischen gültig. Man kann zusammenfassen, dass der thermodynamische Wirkungsgrad und die NO_x Emission miteinander zusammenhängen. Steigt der Wirkungsgrad der Verbrennung bei den hier betrachteten Brennverfahren, so erhöhen sich typischerweise auch die NO_x Emissionen. Figur 8 zeigt beispielhaft die Auswirkung des NO_x Grenzwertes auf den Wirkungsgrad eines Motors bei variierender Last (BMEP bezeichnet den effektiven Mitteldruck des Motors, dieser ist für einen gegebenen Motor proportional zum Drehmoment, welches wiederum bei konstanter Drehzahl proportional zur Leistung ist).

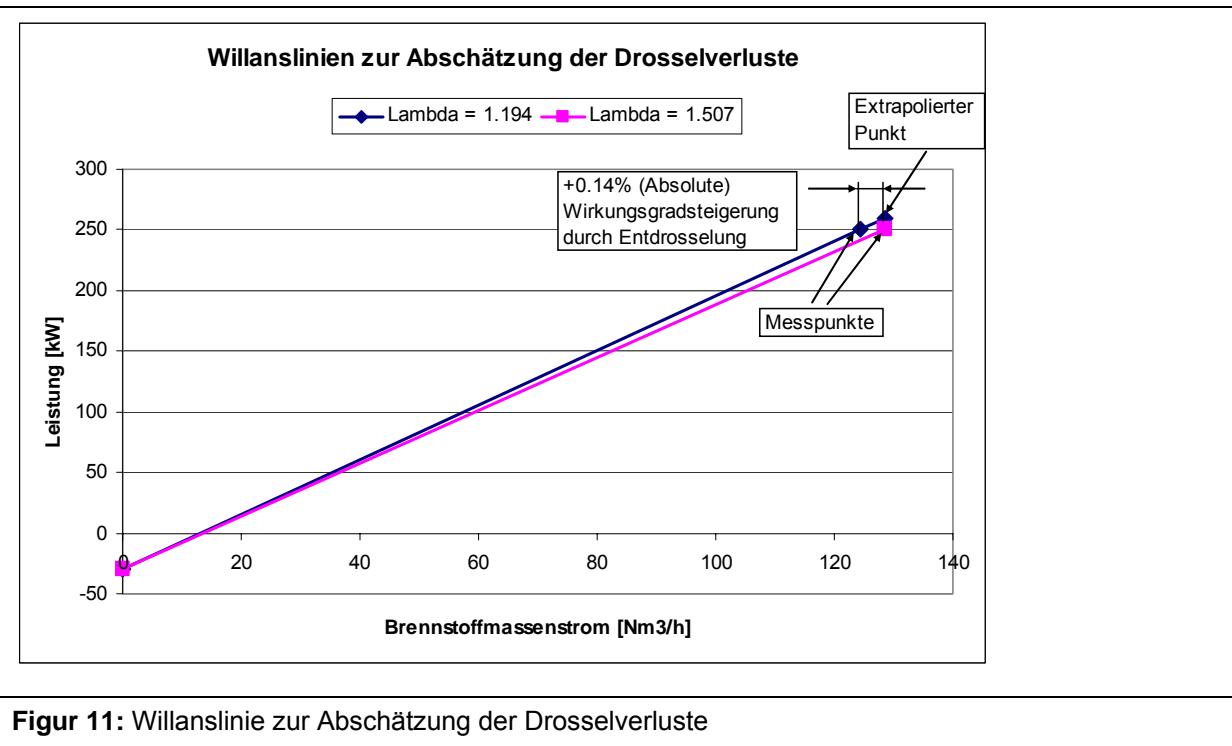


Die in Figur 10 dargestellten elektrischen Wirkungsgrade sind in den Anfangs erwähnten Messungen (Messaufbau siehe Figur 9) an einem Biogas-BHKW ermittelt worden. Der Wirkungsgrad der Basis-einstellung wird mit 100% angegeben, da hier nur die Differenzen von Interesse sind. Hierbei zeigt sich bei einer Einstellung des Gemisches auf einen λ -Wert von 1.194 bei gleicher Leistung (Erhöhte Drosselung) eine relative Wirkungsgradsteigerung von 3.24%. Dies entspricht einer um 3.24% erhöhten Stromproduktion. Es ist zu erwähnen, dass der Betrieb bei tieferem Lambda die thermische Belastung der Bauteile erhöht und die Kühlung entsprechend ausgelegt werden muss.



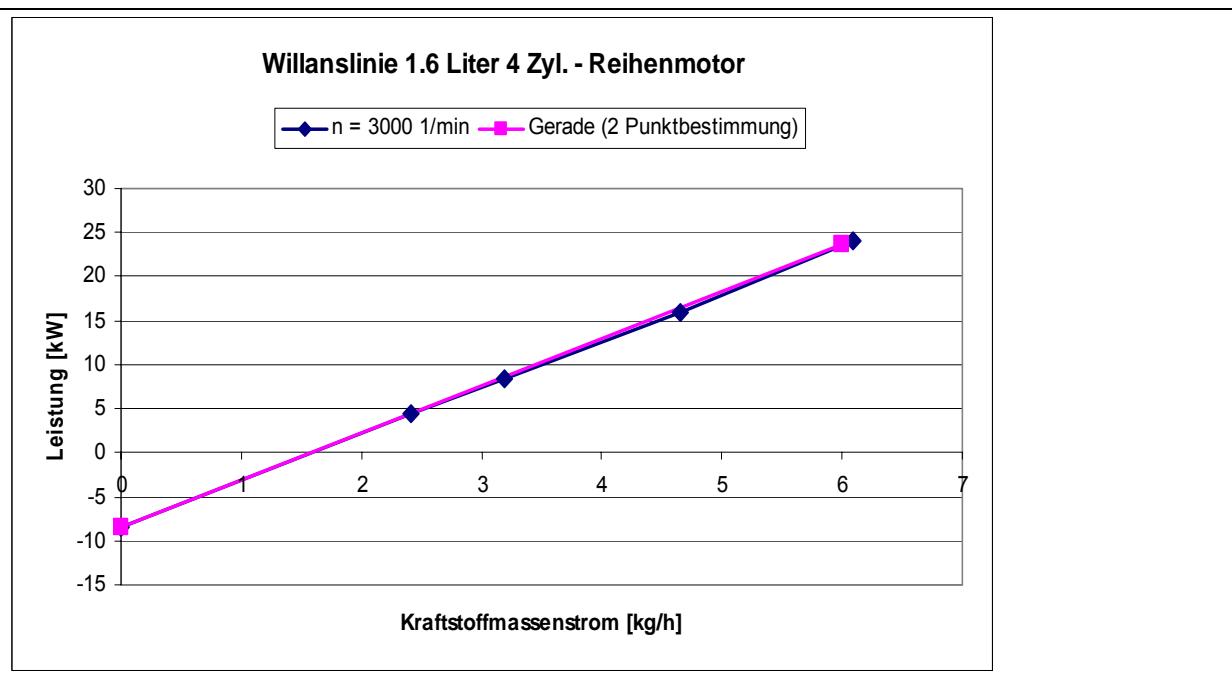
Durch das „Anfetten“ des Gemisches steigt ebenfalls das Drehmoment bzw. die Leistung des Motors. Bei einer Anfettung des Gemisches von $\lambda = 1.50$ auf $\lambda = 1.20$ und konstantem Saugrohrdruck erhöht sich auch die Leistung des Motors um ca. 20%, da der Zusammenhang zwischen Brennstoffmasse und Leistung nahezu linear ist. Um die Leistung konstant zu halten, muss der Motor über seine Drosselklappe gedrosselt bzw. stärker gedrosselt werden als im Magerbetrieb. Hiermit geht wiederum eine Verschlechterung des Wirkungsgrades einher. Zur Abschätzung dieser Drosselverluste kann man den sogenannten „Willans-Ansatz“ (Figur 11) anwenden.

Bei diesem Verfahren wird der Zusammenhang zwischen Leistung und Brennstoffmassenstrom bei konstanter Drehzahl und konstanter Gemischzusammensetzung als affin betrachtet. Es kann aus einem Messpunkt und der bekannten Schleppleistung eine Geradengleichung hergeleitet werden. Durch Extrapolation dieser Geraden kann aus dem Wirkungsgrad (Verhältnis Leistung/(Brennstoffmassenstrom * Heizwert)) eines gedrosselten Betriebspunktes der Wirkungsgrad eines ungedrosselten bzw. weniger gedrosselten Betriebspunktes bestimmt werden. Um den Einfluss auf den Wirkungsgrad der oben angesprochenen erhöhten Drosselung, bei Anfettung des Gemisches auf den λ -Wert von 1.194, zu bestimmen, wird die Leistung dieses Betriebspunktes bei dem Kraftstoffmassenstrom der $\lambda = 1.507$ Einstellung ermittelt. Hieraus kann direkt der Wirkungsgrad bestimmt werden. Die daraus resultierenden Werte können der Figur 11 entnommen werden.



Figur 11: Willanslinie zur Abschätzung der Drosselverluste

Um die Eignung dieses Verfahrens zu belegen ist in Figur 12 eine Willanslinie aus Messungen an einem 1.6 Liter 4 Zylinder Benzin Ottomotor dargestellt. Die Geradengleichung, die in diesem Diagramm abgebildet ist, wurde nach demselben Verfahren wie für das BHKW aus zwei Punkten hergeleitet.

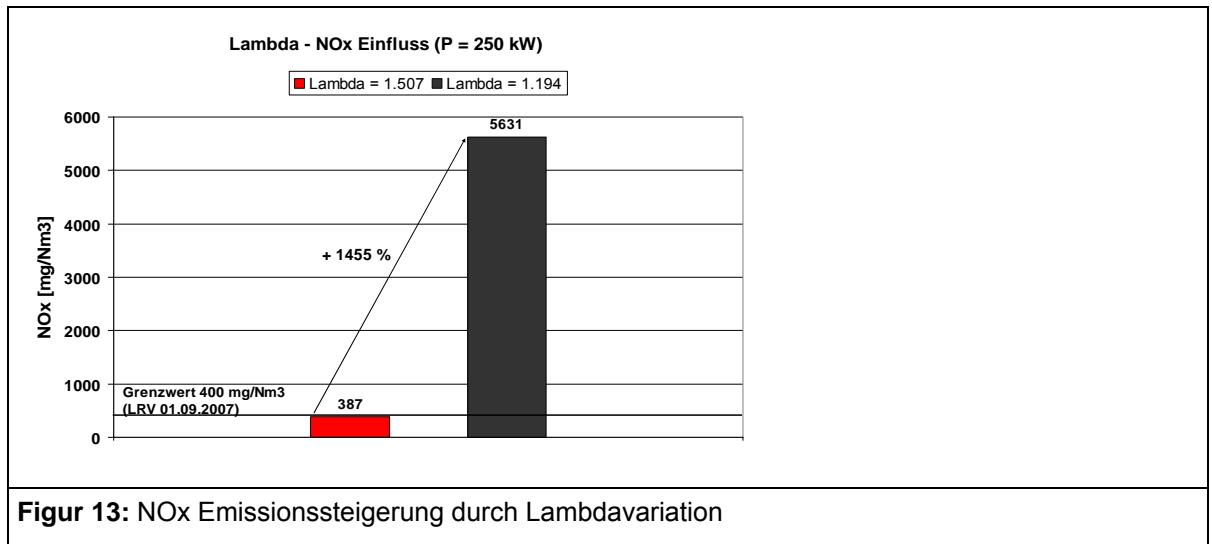


Figur 12: Validierung der Willanslinie anhand realer Messwerte an einem mit $\lambda = 1.0$ betriebenen PKW Benzinmotor

Man erkennt sehr gut den nahezu deckungsgleichen Verlauf zwischen der Geraden, die mit mehreren Messpunkten erstellt wurde und der vereinfachten, aus zwei Punkten erstellen Willanslinie.

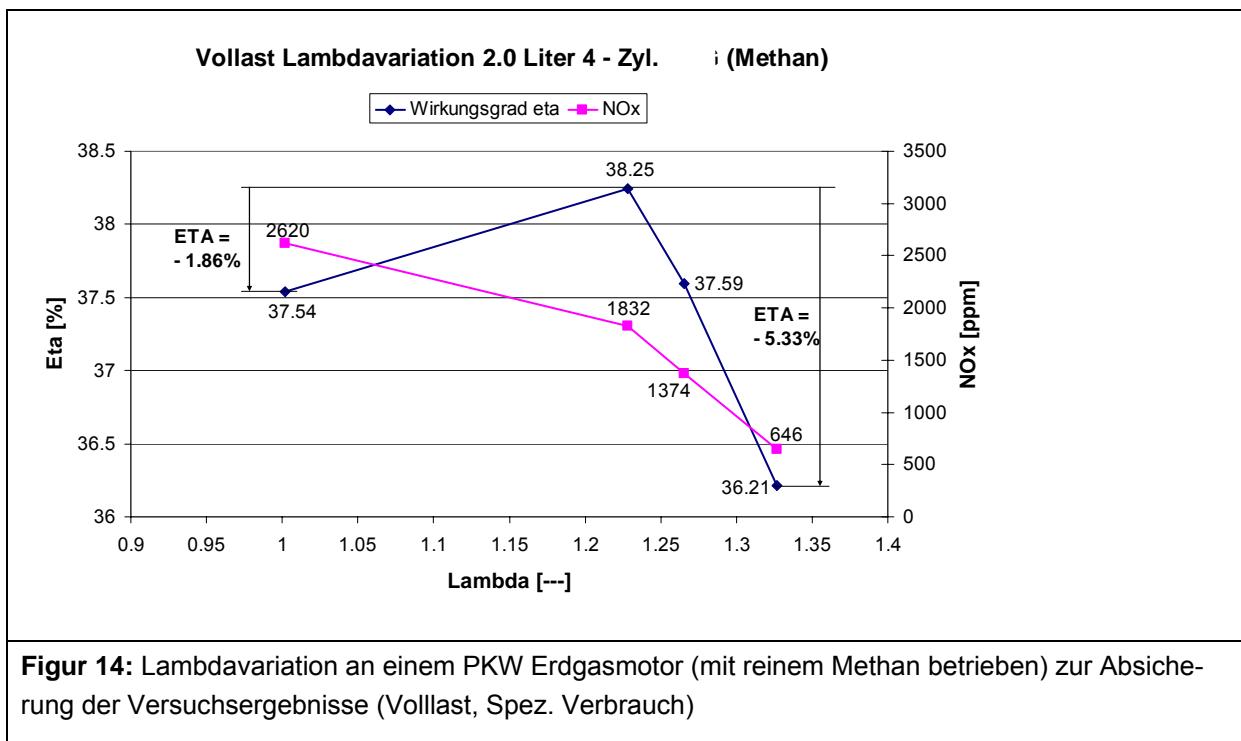
Figur 13 zeigt die NO_x Emissionen der Lambdavariationsmessung des Biogas-BHKW's. Wie zu erwarten steigen die NO_x Emissionen sehr stark an und zeigen nahezu einen 15x höheren Wert gegenüber

der Basiseinstellung. Um die Grenzwerte mit dieser Gemischeinstellung einhalten zu können wird eine NO_x-Abgasnachbehandlung benötigt, die eine mindest NO_x Konvertierungsrate von 92.9% aufweist. Ein geeignetes System hierfür ist im nächsten Abschnitt beschrieben.

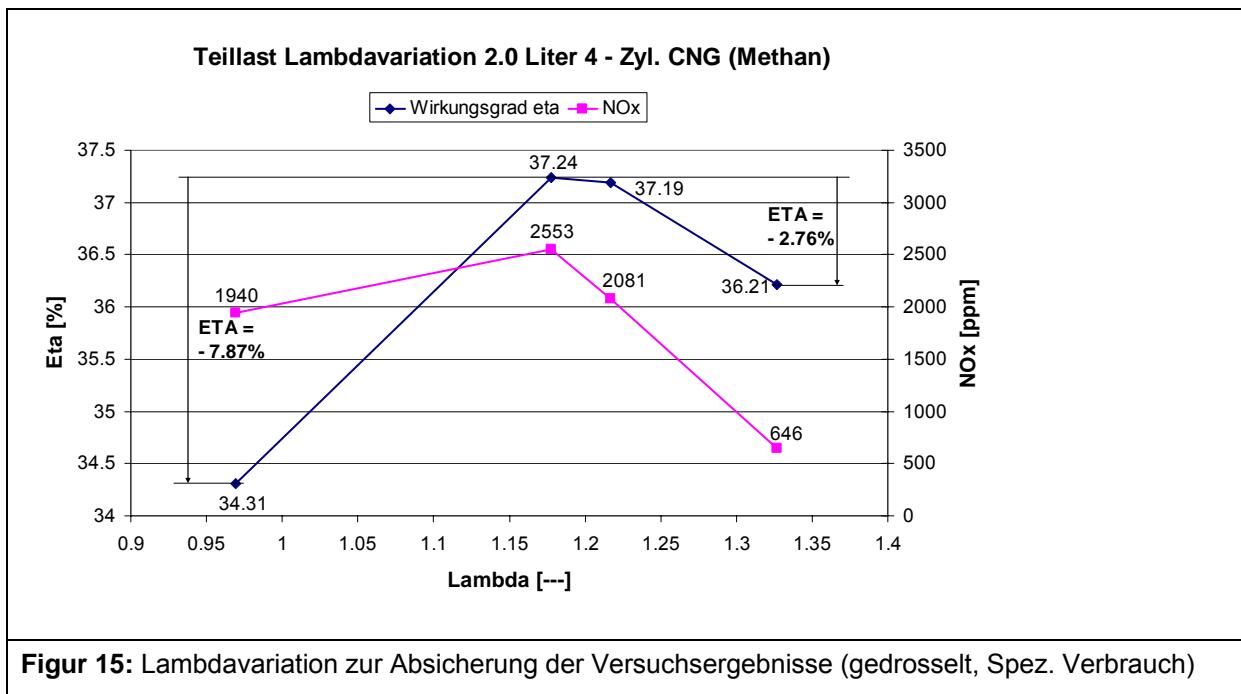


Zur Absicherung der Versuchsergebnisse wurden am Motorenprüfstand der Empa an einem PKW Motor (2 Liter, 4 Zylinder Reihenmotor), der mit reinem Methan betrieben wurde, Lambdavariationen bei $n = 2600$ 1/min durchgeführt. Der Motor wurde soweit abgemagert bis ein deutlich unruhiger Motorlauf festgestellt werden konnte, jedoch noch keine Aussetzer auftraten. Es war hierbei leider nicht möglich, exakt dieselben Lambda Werte des BHKW's nachzufahren, da die Gemischbildung und das Zündsystem keine weitere Abmagerung als $\lambda = 1.327$ zuließen. Dies ist zur qualitativen Beurteilung allerdings ausreichend.

Das Diagramm in der Figur 14 zeigt die Ergebnisse für reinen Vollastbetrieb. In den Lambdabereichen, die in dem Versuch gemessen wurden, zeigt die Einstellung $\lambda = 1.228$ den niedrigsten spezifischen Verbrauch und damit den besten Wirkungsgrad.

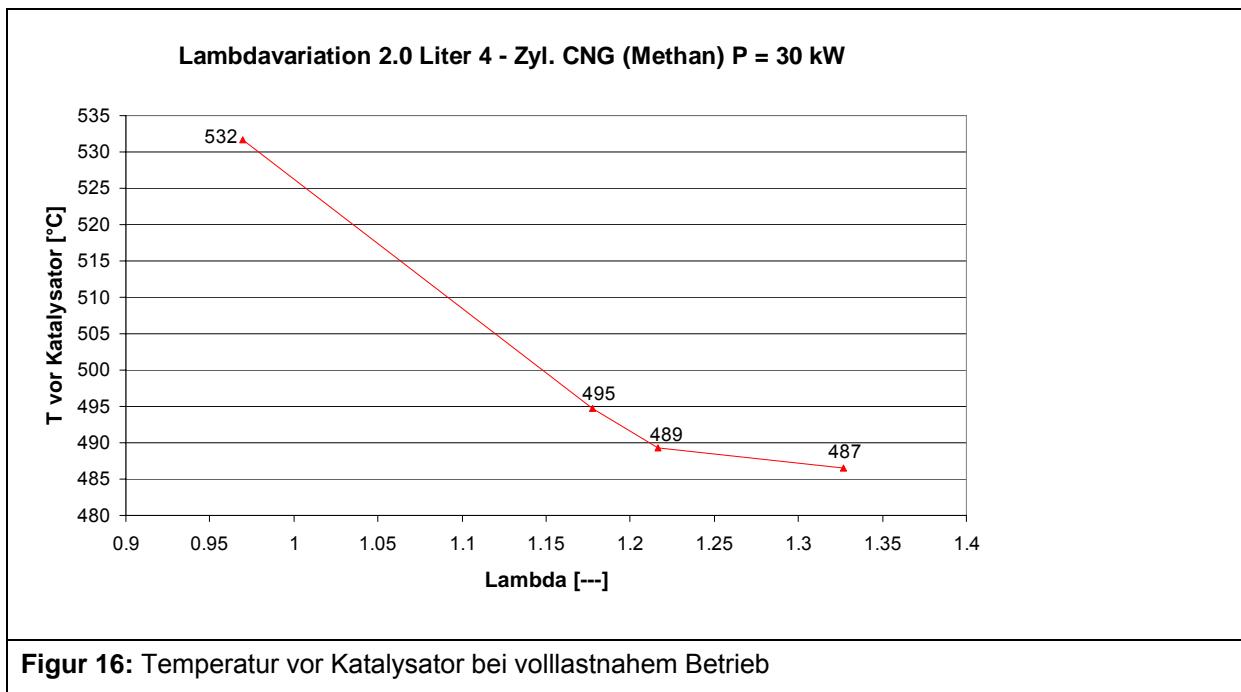


Diese Annahme wird bestätigt durch die in Figur 15 dargestellte Messung im gedrosselten Betrieb. Hierbei wurde die Leistung für alle Lambda Einstellungen konstant gehalten. Der Volllastleistungswert im magersten Betriebspunkt diente hierbei als Referenzleistung. Diese Messung wurde zusätzlich zur Potentialabschätzung der Entdrosselung durchgeführt.



Figur 15: Lambdavariation zur Absicherung der Versuchsergebnisse (gedrosselt, Spez. Verbrauch)

In der Figur 16 sind als weitere Information die Abgastemperaturen vor Katalysator der Lambdavariationen dargestellt. Hieraus kann das zur Verfügung stehende Energieniveau bzw. die Unterschiede zwischen den jeweiligen Einstellungen abgeleitet werden. Dies ist sinnvoll, um das Potential für eine Energieumwandlung der Abgasenergie abschätzen zu können.



Figur 16: Temperatur vor Katalysator bei volllastnahem Betrieb

2.1.2 SCR (Selective Catalytic Reduction) Abgasnachbehandlung

Zur Reduzierung der hohen NO_x Emissionen auf Werte unter dem geltenden Grenzwert wird bei einer wirkungsgradoptimalen Verbrennung eine geeignete Abgasnachbehandlung benötigt. Es existieren zwei bekannte Technologien mit denen eine NO_x Reduktion erreicht werden kann:

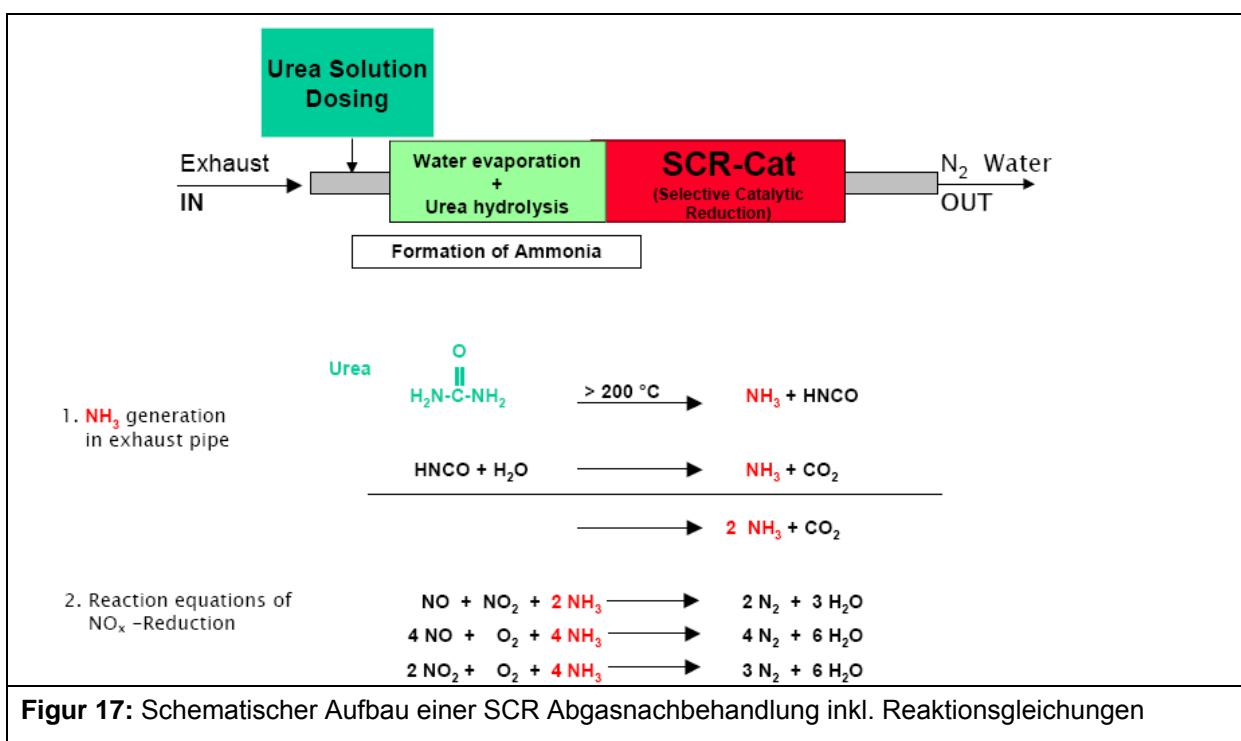
1. Die Verwendung von NO_x Speicherkatalysatoren mit periodischer NO_x-Reduktion durch fetten Motorbetrieb,
2. Die Verwendung von selektiver katalytischer Reduktion (SCR).

Technologie 1. ist im PKW Bereich eingeführt, sie leider ist sehr empfindlich auf Katalysatorgifte. Sie benötigt nach dem Katalysator eine schnelle NOx-Sonde, welche bei für BHKW's typischem Dauerbetrieb nicht ausreichend Langzeitfest ist. Zudem ist der periodisch fette Motorbetrieb bezüglich Wirkungsgrads sehr schlecht. Aus diesen Gründen konzentriert sich dieser Abschnitt auf die einfachere und robustere SCR Technologie.

Figur 19 zeigt schematisch den Aufbau eines SCR Abgasnachbehandlungssystems. Diese Systeme werden im Kraftwerks- und im Nutzfahrzeugbereich grosstechnisch eingesetzt. Auch diesel- oder erdgasbetriebene BHKW's werden teilweise mit dieser Technologie ausgerüstet. Mit der SCR Abgasnachbehandlung sind NO_x – Konvertierungsrationen von bis zu 99% möglich (abhängig von der eingedüsten Reagenzmenge und der Katalysatordimensionierung).

Der Unterschied zu konventionellen Katalysatoren besteht primär darin, dass zur Katalyse eine Reagenz benötigt wird. Als Reagenz wird meist eine wässrige Harnstofflösung (z.B. mit der Produktbezeichnung "AdBlue") eingesetzt, die als Kostenfaktor mit berücksichtigt werden muss. Wie den Reaktionsgleichungen in Figur 17 zu entnehmen ist, wird der Harnstoff durch thermische Hydrolyse in Ammoniak (NH₃) und CO₂ umgewandelt. Der gebildete Ammoniak reagiert im SCR – Katalysator zusammen mit den Stickoxiden (NO_x) zu Stickstoff (N₂) und Wasser (H₂O).

Durch den Stationärbetrieb, der in Kraftwerken aber auch in BHKW's vorliegt und das hohe Temperaturniveau kann die Eindüsstrategie des Harnstoffreagens, im Gegensatz zu transient betriebenen Nutzfahrzeugmotoren, sehr einfach ausfallen.

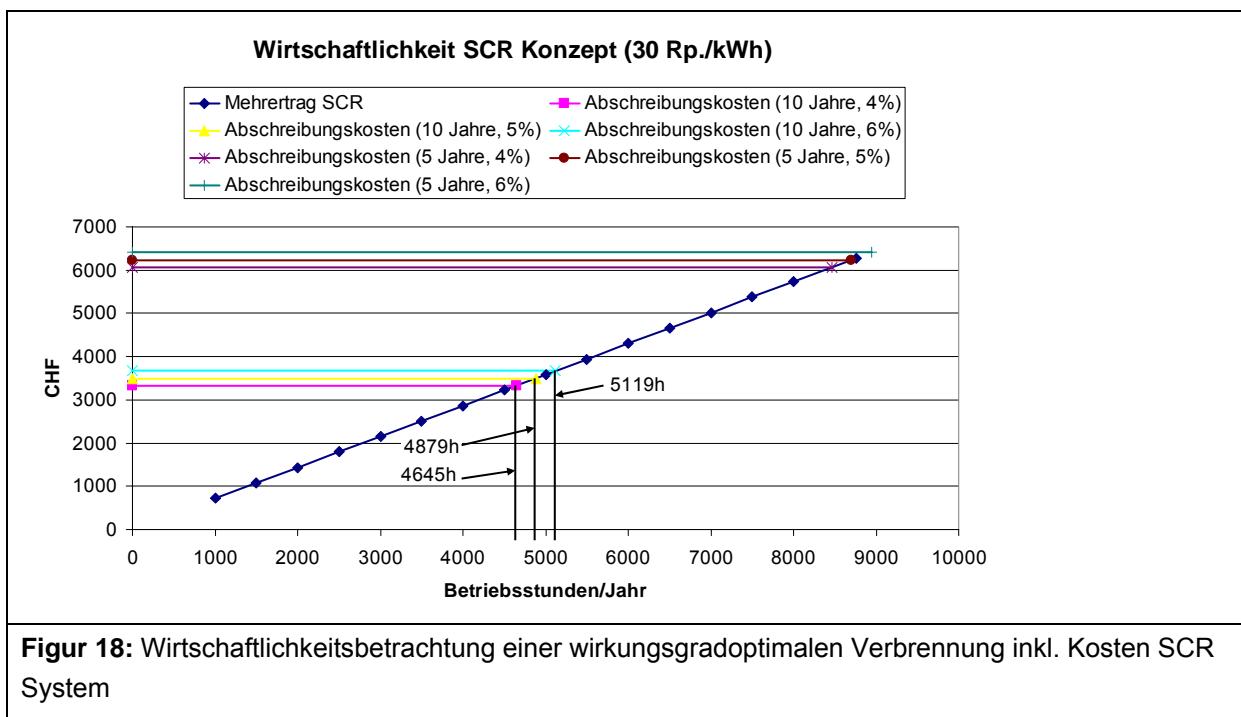


Im Rahmen dieser Studie wurde mit der Fa. HUG Engineering AG, Elsau, eine SCR Abgasnachbehandlung für das den Messdaten zugrundeliegende Biogas BHKW mit einer Leistung von 250 kW evaluiert (Kap. 2.1.1). In Tabelle 2 sind die abgeschätzten Kosten für ein einzeln angefertigtes SCR Komplettssystem dargestellt.

Komponente	Kosten
CombiKat EM6.120, Gleichrichter, Mischer, Stutzen für SCR - Düse	
SCR - Katalysatoren (2 Reihen a je 6 Katalysatoren)	1900.- CHF
SCR - Dosiersystem SEP 14	
SCR - Düse DE14500	
Systemgesamtkosten	27000.- CHF
Benötigte AdBlue Eindüsmenge 3.7 l/h a 0.5,- CHF/l	1.85.- CHF/h
Betriebskosten (3000 Betriebsstunden/Jahr)	5550.- CHF/Jahr

Tabelle 2: Angebot SCR System Fa. HUG Engineering

Die Anschaffungskosten für ein einzelnes System liegen mit 27000,- CHF recht hoch, jedoch relativieren sich diese Kosten über die Lebensdauer eines BHKW's. Da SCR Katalysatoren typischerweise nicht Edelmetall- sondern Vanadium-basiert sind, sind sie (auch für den Fall eines notwendigen Austausches) recht kostengünstig. In der Figur 18 ist eine Wirtschaftlichkeitsrechnung für eine wirkungsgradoptimale Verbrennung inklusive Betriebskosten einer SCR Abgasnachbehandlung dargestellt.

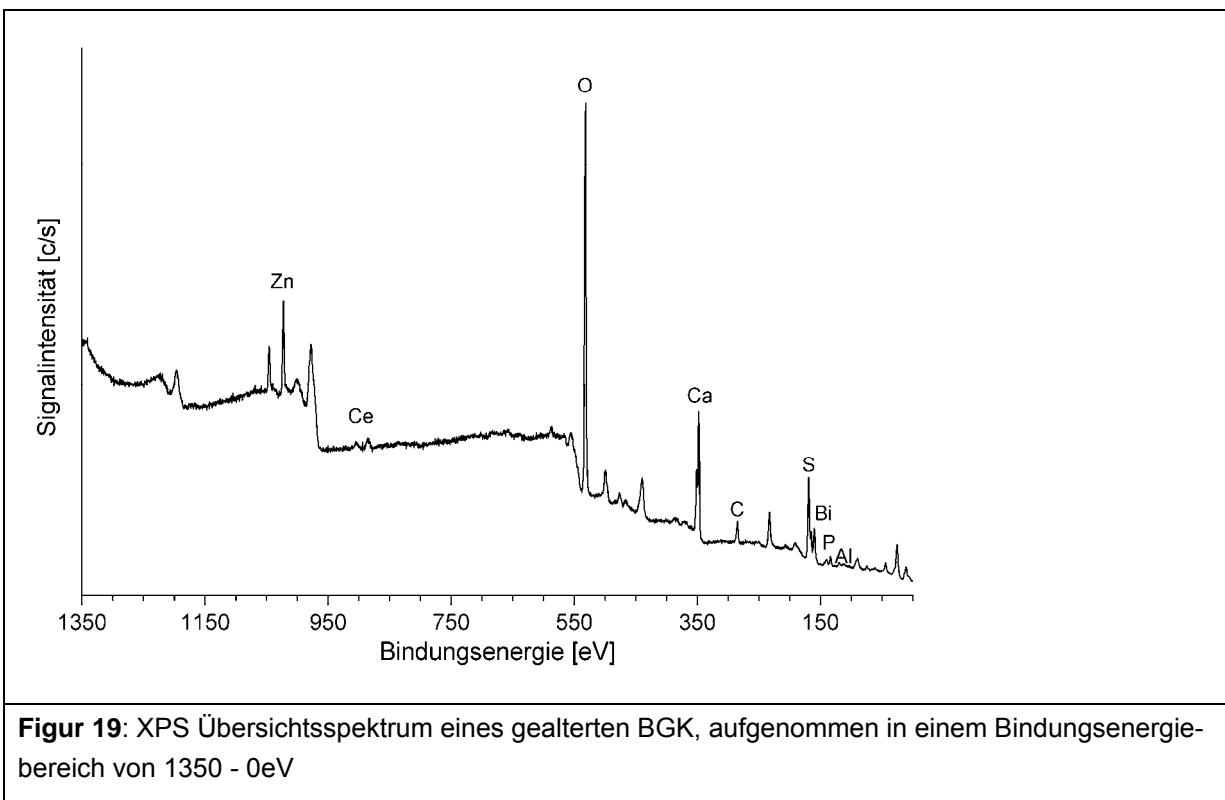


Der dargestellte Mehrertrag ergibt sich aus dem in Kapitel 2.1 beschriebenen erhöhten Wirkungsgrad abzüglich der in Tabelle 2 angegebenen Betriebskosten für das Harnstoffreagenz. Die Ergebnisse beziehen sich zwar auf die vorliegenden Messergebnisse der oben beschriebenen BHKW Anlage, sollten jedoch prinzipiell auch für kleinere und grössere Anlagen gelten. Diese Annahme begründet sich in der Tatsache, dass die Wirkungsgraderhöhung durch wirkungsgradoptimale Verbrennung in etwa konstant für verschiedene Leistungsklassen ausfallen sollte und die Kosten für das Harnstoffreagenz mit dem Abgasmassenstrom bzw. der Leistung linear skaliert. Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass bei einem Abschreibungszeitraum von 10 Jahren (4% Kapitalzins, Einspeisevergütung = 30 Rp./kWh) und einer jährlichen Betriebsdauer von mindestens 4645h (Volllastbetrieb) ein SCR Abgasnachbehandlungssystem, bei der gemessenen Wirkungsgradsteigerung, wirtschaftlich sinnvoll ist. Der genaue Berechnungsweg ist dem Anhang dieses Berichts zu entnehmen.

2.1.3 Chemische Alterung eines Biogas-WKK-Oxidationskatalysators (BGK)

Oxidationskatalysatoren werden in Gasmotoren eingesetzt, um Kohlenwasserstoffe (v.a. Methan) sowie Kohlenmonoxyd zu oxidieren. Solche Katalysatoren bestehen aus einer metallischen oder keramischen Trägerstruktur, welche mit einer katalytisch Elemente enthaltenden Schicht (sog. Wash-coat) überzogen sind. Katalysatoren können thermisch oder chemisch altern sowie vergiftet werden. Katalysatorgifte können aus dem Brennstoff, aus dem Motorenöl oder aus Abrieb auf den Katalysator gelangen und reduzieren durch die Blockierung der Aktivkomponenten oder dem Trägermaterial seine Wirksamkeit. Als Katalysatorgifte sind Schwefel, Phosphor, Calcium, Zink sowie weitere potenzielle Abgaskomponenten bekannt. Eine Schwefelvergiftung lässt sich beispielsweise bei Temperaturen über etwa 600 °C regenerieren, andere Vergiftungen gelten als nicht reversibel.

Untersucht wurde eine Probe im Eintrittsbereich eines Biogas-WKK-Oxidationskatalysators (BGK) nach einer Betriebszeit von 3500 Stunden unter Verwendung von Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) sowie Rasterelektronenmikroskopie (SEM) und energiedispersiver Röntgenanalytik (EDX). Ziel der Analyse war zu identifizieren, welche Katalysatorgifte nach dieser Betriebszeit vorhanden sind. Figur 19 zeigt ein XPS Übersichtsspektrum anhand dessen die Elementzusammensetzung an der BGK-Oberfläche bis in eine Tiefe von einigen Nanometern bestimmt werden kann. Eine quantitative Auswertung dieses Spektrums findet sich in Tabelle 3.



Deutlich erkennbar sind Signale des Zink (Hauptsignal Zn 2p_{3/2} bei 1023 eV), Calcium (Hauptsignal Ca 2p_{3/2} bei 348 eV) und Schwefel (Hauptsignal S 2p bei 169 eV BE). Ebenfalls detektiert wurden kleinere Mengen an Phosphor (Hauptsignal P 2p_{3/2} bei 134 eV). Zn-, Ca-, P- und S – haltige Verbindungen finden sich als Additivbestandteile im Motoröl. Zudem enthält das Biogas signifikante Mengen an Schwefel, welche in dem hier betrachteten Fall zuvor nicht durch eine Entschwefelungsanlage entfernt wurden. Diese sich mit der Zeit im Katalysator akkumulierenden Verunreinigungen bedingen die chemische BGK-Alterung und reduzieren seine katalytische Aktivität.

Weitere detektierte Elemente sind Sauerstoff (Hauptsignal O 1s bei 532 eV), Kohlenstoff (Hauptsignal C 1s bei 285 eV) und geringe Mengen von Aluminium (Hauptsignal Al 2s bei 121 eV). Der hohe Sau-

erstoffanteil ergibt sich aus der Tatsache, daß die jeweiligen Elemente fast ausschliesslich in oxidi-
scher Form vorliegen (z.B. ZnSO_4 , Ca_2PO_4 , Mischoxide).

Element	Konzentration (Atom%)
Sauerstoff	56.7
Schwefel	13.4
Kohlenstoff	9.7
Calcium	9.4
Zink	3.5
Aluminium	1.8
Phosphor	1.7
Bismut	0.6
Cer	0.3

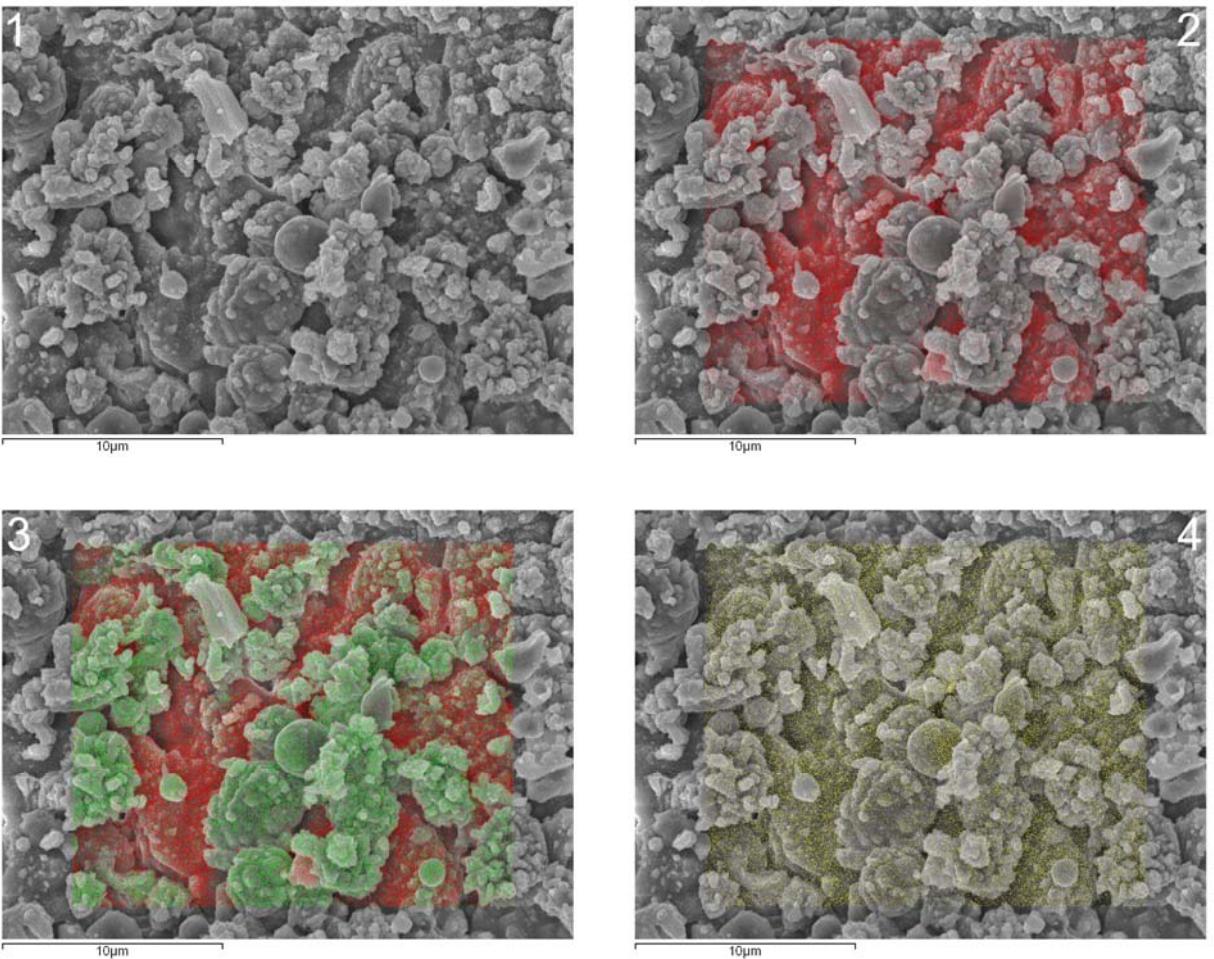
Tabelle 3: Konzentrationen der im XPS Übersichtsspektrum (Figur 19) detektierten Elemente

In der Atmosphäre vorkommende Kohlenwasserstoffe adsorbieren zwangsläufig an jeder unter normaler Atmosphäre gelagerten Probe und geben ein Kohlenstoffsignal im XPS Spektrum (Figur 19, 285 eV). Daher kann nicht gesagt werden, ob prozessbedingt zusätzlich Kohlenstoff oder Kohlenwasserstoffe auf dem BGK angelagert sind.

Aluminiumoxid (Al_2O_3) fungiert generell als Trägermaterial für die katalytisch aktiven Elemente und besitzt im BGK eine ausgesprochen hohe Konzentration. Demzufolge liefert Aluminium im Falle eines fabrikneuen BGK ein sehr starkes Signal im XPS Spektrum. Die geringe Al-Konzentration an der Oberfläche des gealterten BGK deutet auf die Ausbildung einer Deckschicht hin, welche das darunter liegende Al des Aluminiumoxids abschirmt.

Bestätigt wird dies durch die in Figur 20 aufgeführten SEM/EDX-Aufnahmen. Links oben ist eine SEM-Aufnahme der gealterten BGK-Oberfläche zu sehen. Die Oberflächenmorphologie ist sehr heterogen und weist eine stark zerklüftete Struktur auf. Rechts oben ist dem SEM-Bild die Elementverteilung des vom BGK stammenden Aluminiums überlagert (rote Punkte). Letzteres wird praktisch ausschliesslich in den tiefer gelegenen Strukturen detektiert und stellt die eigentliche BGK-Oberfläche dar. Links unten wurde die Elementverteilung von Schwefel (grüne Punkte) hinzugefügt. Es wird deutlich, daß die Ablagerungen auf dem BGK sehr viel Schwefel enthalten, wohingegen im BGK selbst kaum Schwefel detektiert wurde. Die Verunreinigungen Calcium und Zink weisen ein zum Schwefel nahezu identisches Verteilungsmuster auf (nicht in Figur 20 dargestellt) und finden sich demzufolge ebenfalls primär in den Ablagerungen. Anders verhält es sich bei Phosphor. Gemäß dem rechten unteren Bild in Figur 20 (gelbe Punkte) ist dieser homogener über den gesamten analysierten Bereich verteilt und findet sich sowohl im BGK selbst als auch, zu einem geringeren Teil, in den Ablagerungen auf dem BGK.

Ebenfalls detektiert wurden sehr geringe Mengen an Bismut (Hauptsignal $\text{Bi } 4f_{7/2}$ bei 160 eV) und Cer (Hauptsignal $\text{Ce } 3d_{5/2}$ bei 886 eV), deren Ursprung jedoch nicht bestimmt werden konnte.



Figur 20: SEM-Aufnahme (1-4) inklusive EDX-Elementverteilungen (2-4) eines gealterten BGK. Rote Punkte: Aluminium, grüne Punkte: Schwefel, gelbe Punkte: Phosphor.

Man erkennt deutlich, dass Katalysatorgifte bei Biogasbetrieb auf den Katalysator gelangen. Es wäre abzuklären, ob Modifikationen am Motorenöl oder am Biogas notwendig sind, um langlebige Abgasnachbehandlungssysteme einzusetzen. Falls solche Modifikationen notwendig wären, würde dies die Wirtschaftlichkeit z.B. des SCR Ansatzes verschlechtern.

2.1.4 Wirkungsgradpotential bei getaktetem Vollastbetrieb gegenüber Teillastbetrieb

Sind bis vor kurzem auf landwirtschaftlichen Betrieben der Schweiz meist Anlagen in der Grösse 100-250 kW installiert worden, wird die stark leistungsabhängige Gestaltung der Einspeisevergütung mit grosser Wahrscheinlichkeit zu vermehrtem Einsatz von kleineren Anlagen oder aber zum Teillastbetrieb von grösseren Anlagen führen. Ökologisch kann der breitflächigere Einsatz von tieferen Einzelleistungen auf landwirtschaftlichen Betrieben durchaus Sinn machen, so können beispielsweise Transporte lokal fehlender Konservatoren über weite Distanzen vermieden werden. Zudem werden die Abwärmeleistungen auch kleiner, so dass ein grösserer Prozentsatz dieser Abwärmes auf den landwirtschaftlichen Betrieben genutzt werden kann. Auf der anderen Seite werden vermehrt grössere Anlagen bei zentralen Abfallstoffverwertungsanlagen (z.B. Grüngutverwertung) gebaut. Solche Anlagen verstehen typischerweise deutlich mehr als 250 kW.

Allen Anlagen ist gemein, dass sie, getrieben durch die Biogasproduktion oder durch die oben erwähnten wirtschaftlichen Überlegungen, oftmals im Teillastbereich betrieben werden. Stöchiometrisch oder mager laufende Verbrennungsmotoren erreichen ihren Bestwirkungsgrad an der Nennlast. In der Teillast sinkt der Wirkungsgrad (vgl. die Willanslinien im letzten Abschnitt). Es stellt sich daher die Frage, wie der Wirkungsgrad bei tieferer Leistungsanforderung verbessert werden kann. Es sind zwei grundsätzlich verschiedene Ansätze denkbar:

1. Vermeidung von Teillastbetrieb,
2. Verbesserung des Teillastwirkungsgrades.

Dieser Abschnitt befasst sich mit Ansatz 1., der nächste Abschnitt mit Ansatz 2.

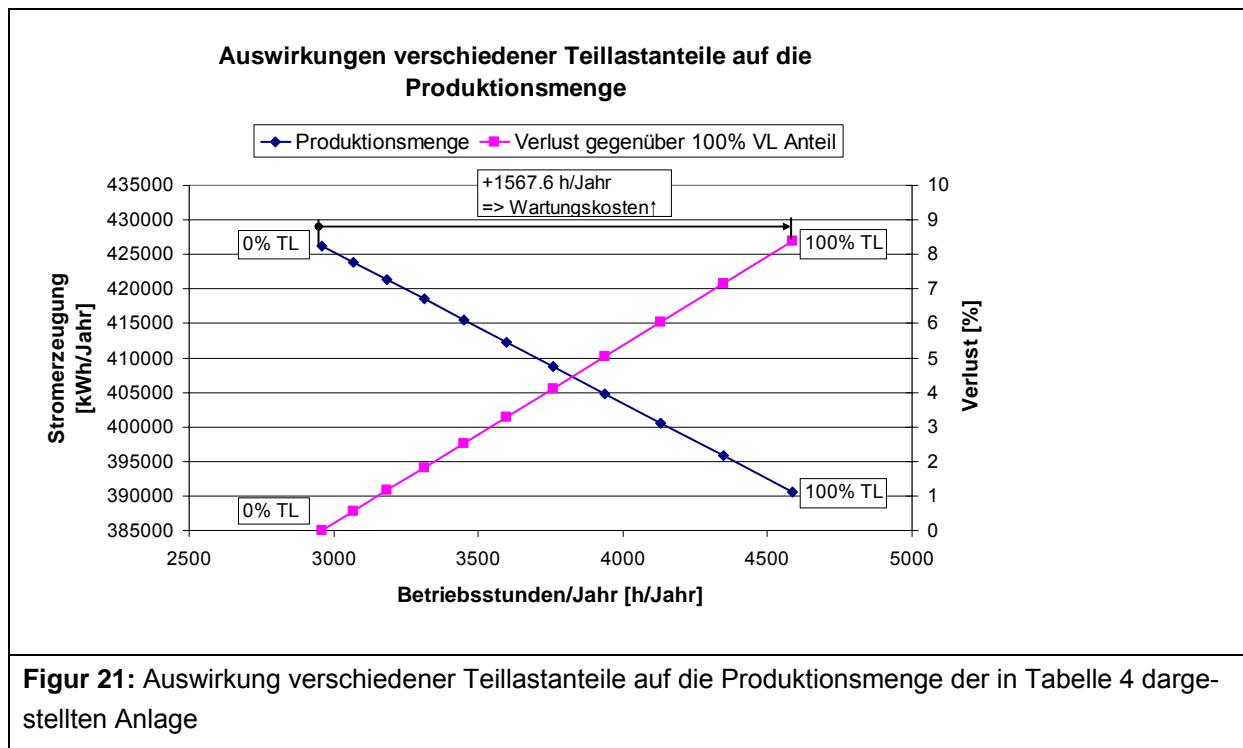
Im Rahmen der bereits unter Kapitel 2.1.1 erwähnten Wirkungsgradbestimmung eines BHKW's wurden auch Teillastversuche durchgeführt. Durch die Ergebnisse der Teillastmessungen lässt sich sehr gut berechnen, welchen wirtschaftlichen Verlust diese Betriebsstrategie mit sich bringt.

In der folgenden Beispielrechnung soll dargestellt werden, wie sich der Output eines BHKW's verändert je höher der Teillastanteil über ein Jahr Betriebsdauer ist. Die Rechnung wurde auf Basis der Werte die in der Tabelle 4 dargestellt sind durchgeführt.

Biogasproduktion	195000	Nm3/Jahr
Gasverbrauch 100% Last	69.2	Nm3/h
Gasverbrauch 59% Last	44.9	Nm3/h
Leistung 100% Last	144.0	kW
Leistung 59% Last	85.2	kW
Wirkungsgrad 59% Last (Relativ zum Vollastwirkungsgrad)	91.3	%
Jährliche Durchschnittsleistung (0%-100% TL)	49.33 – 45.2	kW

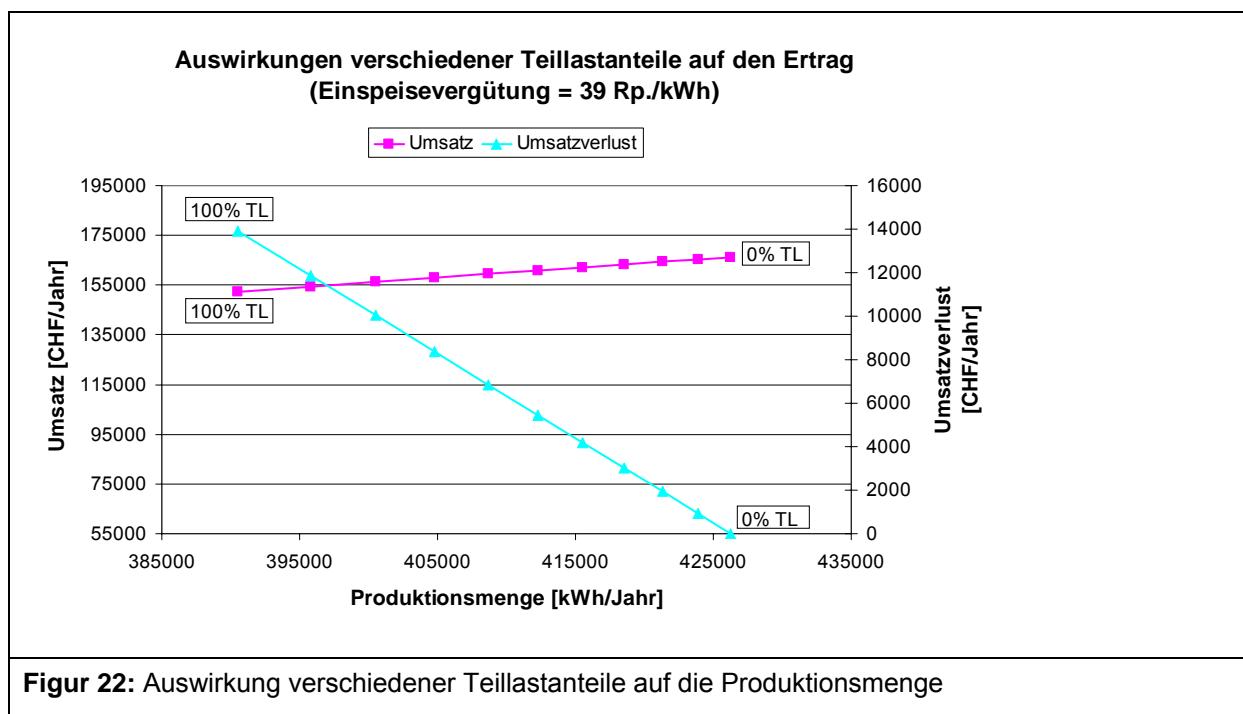
Tabelle 4: Berechnungsgrundlage Teillast/Vollastvergleich

Figur 21 zeigt die Jahrestromerzeugung als Funktion der jährlichen Betriebsstunden dieses BHKW's. Die markierten Punkte stellen jeweils eine Veränderung des Teillastanteils um 10% dar. Wobei 100% Teillastanteil der in der Tabelle 4 angegebenen Teillastleistung entspricht und 0% Teillastanteil der in der Tabelle angegebenen Vollastleistung entspricht. Als weitere Information ist der Verlust an erzeugter Strommenge gegenüber einem reinen Vollastbetrieb dargestellt.



Man kann erkennen, dass für den dargestellten Fall bereits ein Teillastbetrieb von lediglich 10% gegenüber einem getakteten Volllastbetrieb die erzeugte Jahresstromproduktion um ca. 0.56% verringert. Bei reinem Teillastbetrieb liegt diese Reduktion bereits 8.7% unter derjenigen des reinen Volllastbetriebs.

Die Darstellung erzeugte Strommenge als Funktion der Jahres-Betriebsstunden wurde bewusst gewählt, um auch die Problematik der Laufzeit des BHKW's darzustellen. Da in der Regel die Servicearbeiten (Ölwechsel, Abgasuntersuchung, etc.) laufzeitabhängig durchgeführt werden, können bereits aufgrund dieser Tatsache erhebliche Mehrkosten für den Betreiber entstehen. Bei Betrieb eines BHKW's in wohnraumnahen Gebieten ist ausserdem die erhöhte bzw. länger andauernde Schallemission ein weiteres Argument für einen reinen getakteten Volllastbetrieb.



Um die Auswirkung der oben erörterten Daten auf die Wirtschaftlichkeit (ohne Berücksichtigung der im Taktbetrieb vorteilhafteren Unterhaltskosten) darzustellen ist in Figur 22 der Jahreserlös als Funktion der erzeugten Strommenge veranschaulicht. Der Umsatzverlust ist als zusätzliche Information in dem Graphen integriert.

Die als Grundlage dienende relativ kleine Biogasanlage würde bei reinem Teillastbetrieb anstelle von getaktetem Volllastbetrieb jährlich einen Umsatzverlust von ca. 14000,- CHF hinnehmen müssen.

Selbstverständlich bedeutet ein getakteter Betrieb, dass

1. entweder die Biogaserzeugung ebenfalls getaktet erfolgen muss, oder
2. die Biogasanlage über ein genügend grosses Gasspeichervolumen verfügen muss.

Option 1. kommt aus Gründen von Anfahr- und Abstellverlusten sowie wegen der teilweise fragilen Biologie eher nicht in Frage, so dass der Taktbetrieb auf ein Gasspeichervolumen angewiesen ist. Eine Gesamtkostenrechnung unter Berücksichtigung aller Randbedingungen muss projektspezifisch gemacht werden und würde den Rahmen dieser Studie sprengen.

2.1.5 Wirkungsgradpotential bei Entdrosselung durch Ansaugluftvorwärmung

Ein Ottomotor verbrennt ein Gemisch aus Kraftstoff und Luft. Dieses Gemisch ist im Fall von Kohlenwasserstoffen nur in relativ engen Grenzen zündfähig (für reines Methan in Luft liegen die Zündgrenzen bei etwa Lambda 0.6...1.95). Bei einem mager (d.h. mit Luftüberschuss) betriebener Motor muss dieses Kraftstoff-zu-Luft Verhältnis aus Emissionsgründen in einem noch engeren Bereich als der eigentlichen Zündgrenzen bleiben. Dies bedeutet für den Teillastbetrieb, dass nicht (wie bei Dieselmotoren) nur weniger Kraftstoff sondern auch weniger Luft dem Brennraum zugeführt werden muss, d.h. die Dichte des Gemisches wird reduziert und die Gemischzusammensetzung bleibt konstant. Die einfachste Methode der Beeinflussung der Dichte mit dem Vorteil eines sehr schnellen dynamischen Verhaltens ist die Drosselung, d.h. die Beeinflussung des Druckes. Diese Methode hat einen grossen Wirkungsgradnachteil, denn sie verursacht netto eine Pumparbeit: der Motorprozess muss Arbeit dafür aufwenden, Gase vom künstlich erzeugten Unterdruck im Ansaugkrümmer auf den höheren Druck im Auslasskrümmer zu fördern.

Alternativ zur Drosselung kann die Dichte der Ansaugluft auch mittels einer Temperaturerhöhung reduziert werden. Dieser Prozess ist zwar deutlich langsamer als eine Drosselung, dies stellt aber für stationäre Anwendungen wie WKK Anlagen kein Problem dar.

Die Dichte eines idealen Gases ist

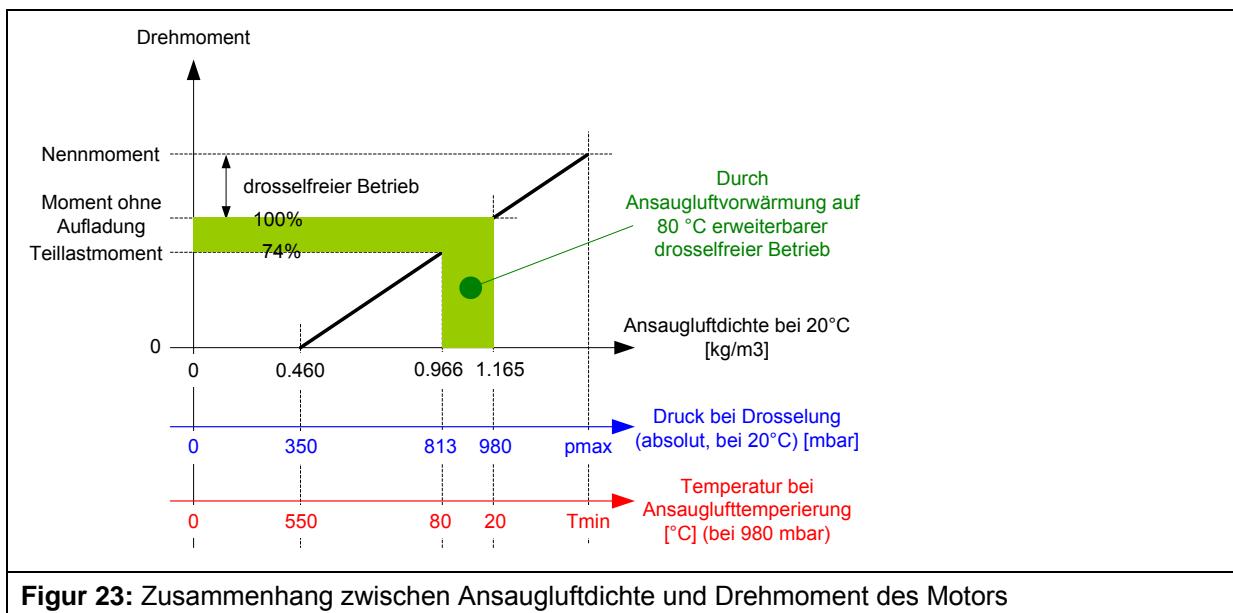
$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (1)$$

wobei p für den (absoluten) Druck steht, R steht für die spezifische Gaskonstante und T für die Temperatur. Luft verhält sich in den im Einlasskrümmer des Motors interessierenden Temperatur- und Druckbereich genügend gut wie ein ideales Gas. Um das Potenzial abzuschätzen, sollen folgende Annahmen getroffen werden:

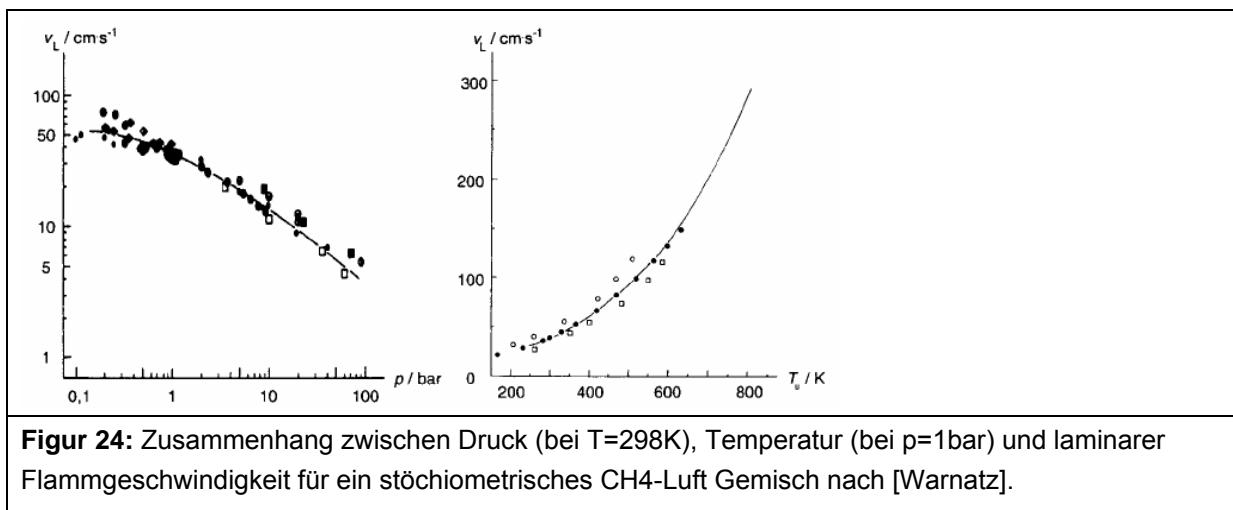
- Der Motor läuft ohne Turbolader bis an die Volllast des Saugbetriebes (d.h. der Turbolader hat einen voll geöffneten Bypass)
- Die Ansaugluft kann mittels eines Kühlwasser/Ansaugluft Wärmetauschers bis auf 80 °C aufgewärmt werden.

- Das Drehmoment des Motors verhält sich affin zur Dichte der angesaugten Luft (dies ist für den Betrieb bei konstantem Lambda und konstanten Liefergrad des Motors näherungsweise gegeben)

Figur 23 zeigt den affinen Zusammenhang zwischen Ansaugluftdichte und Drehmoment mit realistischen Zahlen (Annahme: Umgebungsdruck etwa 980 mbar). Auf der Abszisse sind neben der Luftdichte der Druck bei 20 °C (d.h. Druck nach Drosselklappe bei konventioneller Drosselung) sowie die Temperatur bei drosselfreier Ansaugluftvorwärmung aufgetragen. Man erkennt, dass sich durch eine Ansaugluftvorwärmung auf 80 °C das Drehmoment gegenüber dem Vollast-Saugbetrieb um etwa 26% reduzieren lässt. Je nach Grad der Aufladung liesse sich also der drosselfreie Betrieb um ein beträchtliches Stück erweitern. Selbstverständlich liesse sich dieser drosselfreie Betrieb nochmals deutlich erweitern wenn man die Ansaugluft mittels Abgas/Ansaugluft Wärmetauschers noch höher vorwärmen würde.



Bei Ansaugluftvorwärmung steigt das Temperaturniveau des thermodynamischen Prozesses. Auf die Gemischbildung, Zündung und Verbrennung hat eine Temperaturerhöhung gegenüber einer Drosselung netto Vorteile, Figur 24 zeigt als Beispiel den Einfluss auf die laminare Flammgeschwindigkeit. Nachteilig wirkt sich die Ansaugluftvorwärmung auf das Klopfverhalten aus, allerdings sollte das Klopfen bei richtig ausgelegten Motoren im Teillastbereich kein Problem darstellen. Ob eine Ansaugluftvorwärmung für einen Motor technisch zulässig ist, muss mit dem Motorhersteller von Fall zu Fall geklärt werden.



Da die Vorgänge sehr komplex und nichtlinear gekoppelt sind, lässt sich keine einfache und belastbare Voraussage des Potenzials machen. Man ist auf aufwändige Simulationen oder auf experimentelle Arbeiten angewiesen.

In der Literatur sind einige Arbeiten zu diesem Thema zu finden. Die vollständigste, welche gefunden wurde, befasst sich mit der Ansaugluftvorwärmung bei mager betriebenen Ottomotoren [Ronney]. Dort wird beschrieben, dass die Ansaugluftvorwärmung das Lambda an der Magerlaufgrenze erhöht, d.h. man kann mit magereren Gemischen fahren ohne dadurch Fehlzündungen zu verursachen. Im Bereich des drosselfreien Betriebes bei rund drei Viertel des Saugmotor-Volllastdrehmomentes (wie in Figur 23 dargestellt) wird ein relativer Wirkungsgradvorteil (mit reinem Methan) von 8 % gegenüber gedrosseltem Betrieb experimentell nachgewiesen. Bei noch höheren Ansauglufttemperaturen (bis etwa 280 °C) wird ein relativer Wirkungsgradvorteil von 16 % bei einer drosselfreien Lastabsenkung auf unter 30 % des Saugmotor-Volllastdrehmomentes nachgewiesen. [Ronney] zeigt auch, dass gleichzeitig die NO_x Emissionen deutlich gesenkt werden können. Allerdings werden bei sehr heißer Ansaugluft die CO leicht und THC Emissionen deutlich erhöht, ein Oxidationskatalysator wird also bei solchen Systemen sicherlich notwendig sein.

Diese Methode der Drosselung ist nicht motorgrößenabhängig, sie lässt sich in jedem Leistungsbereich anwenden. Ihr grosser Vorteil gegenüber einem Vollast-Taktbetrieb ist, dass der Motor wie auch bei der konventionellen Drosselung durch den Gasanfall gesteuert kontinuierlich laufen kann und keine zusätzlichen Speichervolumen notwendig sind.

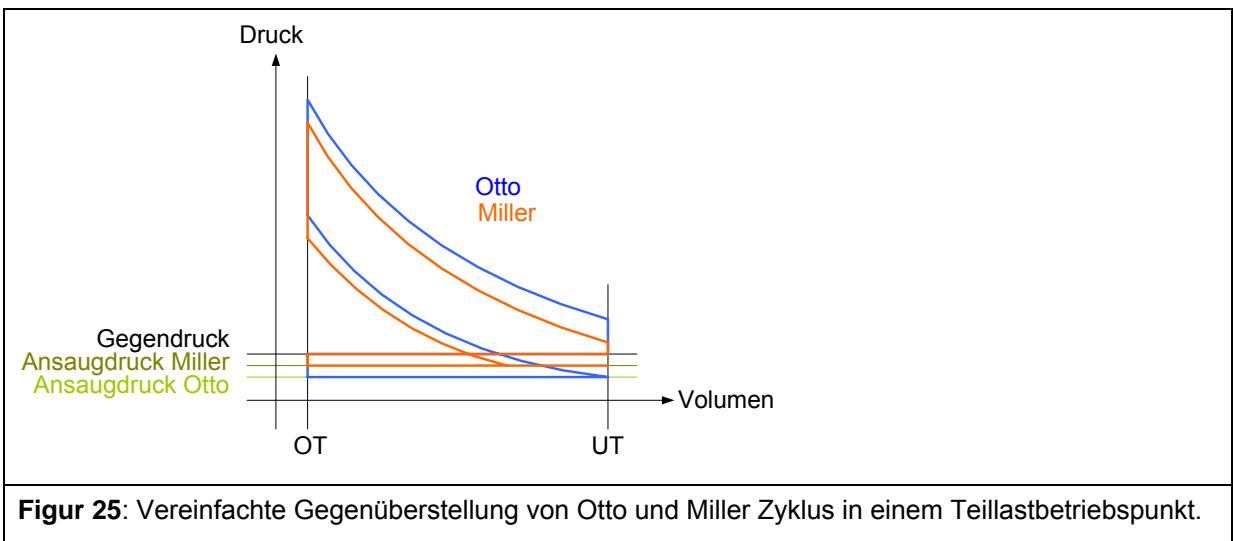
Für die Ausführungen wurde bis jetzt davon ausgegangen, dass der Turbolader in Lastbereichen in welchen kein Ladedruck notwenig ist, z.B. durch ein turbinenseitiges Wastegate umgangen wird. In Realität wird oftmals der Turbolader nicht aktiv gesteuert: ein Wastegate wird (falls überhaupt vorhanden) bei der Inbetriebnahme für den ausgelegten Ladedruck bei Nennleistung fix eingestellt. Die Konsequenz daraus ist, dass im gesamten Lastbereich unter der Vollast die Last verlustbehaftet mittels Drosselklappe eingestellt wird. Bei solchen Konfigurationen kann eine Teillastwirkungsgradverbesserung im Hochlastbereich erreicht werden, indem der Ladedruck ohne luftseitige Drosselung über eine turboladerseitige aktive Steuerung des Wastegates eingestellt wird. Natürlich kann auch in diesem Lastbereich eine Anhebung der Ansauglufttemperatur durch Reduktion der Ladeluftkühlung weitere Verbesserungen bringen, wobei das thermische Verhalten, das Klopfverhalten sowie das Emissionsverhalten experimentell validiert werden müssen.

2.1.6 Modifikation der Ventilsteuzeiten (Miller Zyklus)

Normalerweise werden die Ventilsteuzeiten so ausgelegt, dass der Motor eine maximale Füllung erhält und damit maximale Leistung erbringt. Das Einlassventil öffnet demnach in der Nähe des oberen Totpunktes und schliesst in der Nähe des unteren Totpunktes der Kolbenbewegung. Durch eine Modifikation des Schliesszeitpunktes des Einlassventils lässt sich ein abgeänderter Zyklus realisieren. Frühes Einlassschliessen (in Verbindung mit Aufladung) wird als Miller Zyklus bezeichnet, spätes Einlass Schliessen als Atkinson Zyklus. Es ist zu erwähnen, dass diese Bezeichnungen sind nicht immer konsistent verwendet werden, oftmals wird spätes Einlass Schliessen auch als Miller Zyklus bezeichnet. Beide Zyklen haben gemeinsam, dass sie nicht die maximal mögliche Menge an Frischgas ansaugen und ein grösseres Expansions- als Kompressionsverhältnis haben, was den Wirkungsgrad durch verringerte Expansionsverluste leicht verbessert (d.h. es hat weniger Überdruck im Zylinder zum Zeitpunkt des Ausschlussventil Öffnens). Der Miller/Atkinson Zyklus wird meist in Verbindung mit Aufladung verwendet, d.h. ein Teil der Kompression wird im Verdichter gemacht, dann wird das Arbeitsmedium zwischengekühlt, dann im Motor bis zur Zündung weiter verdichtet ([Miller1], [Miller2]). Der Vorteil dieses Zyklus liegt im, bei gleichem effektiven Verdichtungsverhältnis, tieferen Temperaturniveau.

Dies ermöglicht es, im Vergleich zum gewöhnlichen Otto-Prozess bei hohen Lasten wirkungsgradoptimaler (d.h. früher) zu zünden ohne die NO_x Rohemissionen zu erhöhen. Da der nutzbare Hubraum durch das frühe Schliessen des Einlassventiles verringert wird muss, möchte man gleiche Leistung erreichen, der Ladedruck angehoben werden, d.h. der Lader muss anders ausgelegt werden. Da mager betriebene Gasmotoren oft von Dieselmotoren abgeleitet sind, bietet sich die Gelegenheit das hohe geometrische Verdichtungsverhältnis vom Dieselmotor zu übernehmen und das effektive Verdichtungsverhältnis über die Ventilsteuerzeiten zu reduzieren. Das Wirkungsgradpotenzial dieser Massnahme beträgt gemäss [Shimogata] etwa 2-3 Prozentpunkte.

Dieser reduzierte Hubraum hat in der Teillast Vorteile, dass für ein gewünschtes Teillastdrehmoment weniger gedrosselt werden muss, was den Wirkungsgrad verbessert. Figur 25 stellt den konventionellen Otto sowie den Miller Zyklus vereinfacht für einen Teillastbetriebspunkt dar. Man erkennt, dass die Gaswechselarbeit beim Miller Zyklus durch den höheren Ansaugdruck (Entdrosselung) reduziert wird. Zudem sieht man, dass beim Zeitpunkt wo das Auslassventil öffnet das Druckniveau im Zylinder beim Miller Zyklus tiefer ist, die Energie des Arbeitsgases wird in der Expansion besser genutzt.



Die physikalischen/chemischen Zusammenhänge (Thermodynamik, Gemischbildung, Verbrennung, Emissionsentstehung) sind komplex gekoppelt und ohne aufwändige numerische Untersuchungen oder Experimente nicht quantifizierbar. Bei Dieselmotoren sind einige Publikationen vorhanden (z.B. [Schutting]), welche aufgrund des grundsätzlich anderen Brennverfahrens nicht auf den mager betriebenen Gasmotor übertragbar sind. Ottomotoren mit Miller-Zyklus sind in der Vergangenheit bereits im PKW Bereich erfolgreich eingesetzt worden [Hitomi]. Einige Hersteller haben Gasmotoren mit Miller Prozess im Angebot [Vormstein], dies jedoch vorwiegend für den hohen Leistungsbereich. Das Potential dieser Massnahme für die hier interessierende Anwendung im relativ kleinen Leistungsbereich wäre noch zu untersuchen.

2.1.7 Wassereinspritzung

Bei Dieselmotoren ist der NO_x- und Partikelemissionen senkende Einfluss von Wasser in der Diffusionsverbrennung bekannt [Bertola]. Dort steht die Wasser-in-Diesel Emulsion bei mobilen Anwendungen als Möglichkeit im Vordergrund, diese Massnahme hat praktisch keinen Einfluss auf den Wirkungsgrad. Im Bereich der mageren Vormischverbrennung, so wie sie in Gasmotoren typischerweise zum Einsatz kommt, ist der Einfluss von Wasser in der Verbrennung ebenfalls untersucht worden. In [Tschalamoff1] wurde an einem grossem 1-Zylinder Forschungsmotor gezeigt, dass bei magerer Vormischverbrennung von Methan mittels direkter Wassereinspritzung (bis 40% der Brenngasmasse) in

den Saugtakt ein Wirkungsgradvorteil von 1 bis 1.5%-Punkten resultiert, wenn man die NO_x Emissionen konstant lässt. Zudem wurde gezeigt, dass die Klopfneigung deutlich abnimmt und die Verbrennungsstabilität zunimmt. Ob diese Beobachtungen auch für Biogasmotoren mit hohen Inertgasanteilen ebenfalls gültig sind, wäre abzuklären.

Nimmt man Vollastbetrieb des in Tabelle 4 beschriebenen Motors an, und nimmt man des weiteren an, dass sich durch Wassereinspritzung der Motorwirkungsgrad tatsächlich um einen Prozentpunkt verbesserte, so würde das BHKW anstatt 144 kW nun 148 kW leisten (also pro Stunde rund 4 kWh mehr Strom erzeugen, finanzieller Gegenwert bei einer Einspeisevergütung von 30 Rappen: 1.20 CHF/h). Demgegenüber stehen Kosten für Wasser (bei 40% Wasseranteil bezogen auf die Methanmasse und einem Wasserpreis von 2 CHF/m³ entspricht dies rund 0.05 CHF/h) sowie die zusätzlichen Investitions- und Wartungskosten. Diese Investitions- und Wartungskosten für ein Wassersystem dürfen, selbst wenn eine Entsalzung notwendig sein sollte, nicht allzu hoch sein so dass der Weg der Wassereinspritzung ökonomisch durchaus sinnvoll sein kann.

2.1.8 Abgasrückführung

Neben der bereits beschriebenen Teillast-Entdrosselung durch Erhöhung der Lufttemperatur ist es auch möglich, Abgas in die Frischluft zurückzuführen. Durch die inerten Abgaskomponenten wird der Sauerstoffpartialdruck des Frischgases gesenkt, man muss bei gleichem Lambda weniger drosseln um das gleiche Drehmoment zu erreichen wie ohne Abgasrückführung (AGR). Neben der Entdrosselung (Wirkungsgradsteigerung) bewirkt der durch die Abgasrückführung abgesenkte Sauerstoffpartialdruck zusammen mit der erhöhten thermischen Masse an inerten Komponenten eine deutliche Verringerung der thermischen Stickoxydbildung. Damit das rückgeföhrte Abgas nicht die Zündung erschwert sowie die Verbrennung zu stark verlangsamt, wird bei fremdgezündeten Systemen im Teillastbereich (v.a. PKW Anwendung im Lambda=1 Betrieb) möglichst heißes Abgas zurückgeführt. Bei der mageren Diffusionsverbrennung (Dieselmotor) bzw. bei Gasmotoren an der Vollast wird gekühltes Abgas zurückgeführt [Tschalamoff2]. Im Fall von fremdgezündeten Gasmotoren mit AGR ist einer ausreichend hohen Zündenergie besondere Beachtung zu schenken. Im Allgemeinen führt AGR bei fremdgezündeten Motoren zu einer Erhöhung der zyklischen Variationen der Verbrennung, bei zu hohen AGR Raten kommt es zu Zündaussetzern. In [Tschalamoff2] ist zu sehen, dass gekühlte AGR bei mager betriebenen Gasmotoren zur Senkung von Kohlenwasserstoffemissionen an der Vollast, bei Einstellung für gleichbleibendes NO_x Niveau, eingesetzt werden kann. Der Wirkungsgrad sinkt dadurch tendenziell. Im Fall von mager betriebenen Biogasmotoren liesse sich der Teillastwirkungsgrad bei gleich bleibendem NO_x Niveau vermutlich durch heiße Abgasrückführung verbessern, das Potenzial dieser Massnahme müsste experimentell nachgewiesen werden. Speziell zu beachten ist auch, dass je nach Qualität des Biogases Komponenten aus dem Abgas in den Ansaugtrakt zurückgeführt werden können, welche bezüglich Lebensdauer einzelner Motorkomponenten kritisch sein können. Eine Reinigung des Biogases kann notwendig sein.

2.1.9 Lambda=1 / Abgasrückführung

An der ETH Zürich konnte nachgewiesen werden, dass im Erdgasbetrieb Lambda=1 plus AGR Konzepte mageren Konzepten bezüglich Wirkungsgrad gar überlegen sein können und gleichzeitig, drei-Wege-Katalyse vorausgesetzt, deutlich tiefere Schadstoffemissionen erreichen [Nellen1], [Nellen2]. Lambda = 1 mit AGR ist in der Biogasanwendung auch möglich und wird von der Firma Avesco auch so umgesetzt. Es ist zu erwähnen, dass mit Biogas aufgrund des hohen Inertgasanteiles (insbesondere von CO₂) tiefere AGR Raten als mit Erdgas gefahren werden müssen. Der Wirkungsgrad in der

Klärgasanwendung liegt mit dem Lambda =1 / AGR Konzept etwa 2 Prozentpunkte höher als bei einem herkömmlichen mageren Konzept. Auch hier ist es wichtig, dass mittels Gasreinigung kritische Komponenten (z.B. Schwefel, Silizium) aus dem Biogas entfernt werden müssen, damit die Lebensdauer des Motors und des Drei-Wege-Katalysators nicht leidet. Diese Gasreinigung könnte sich für den Einsatz bei Kleinanlagen als ökonomisch kritisch erweisen, verlässliche Kosten konnten im Rahmen dieser Studie nicht eruiert werden. Der Pfad des Lambda=1 plus AGR Konzeptes sollte auch für die Biogasanwendung bzgl. Möglichkeiten/Kosten/Nutzen detailliert betrachtet werden.

2.2 Möglichkeiten der exergetischen Abwärmenutzung

2.2.1 Stirlingprozess

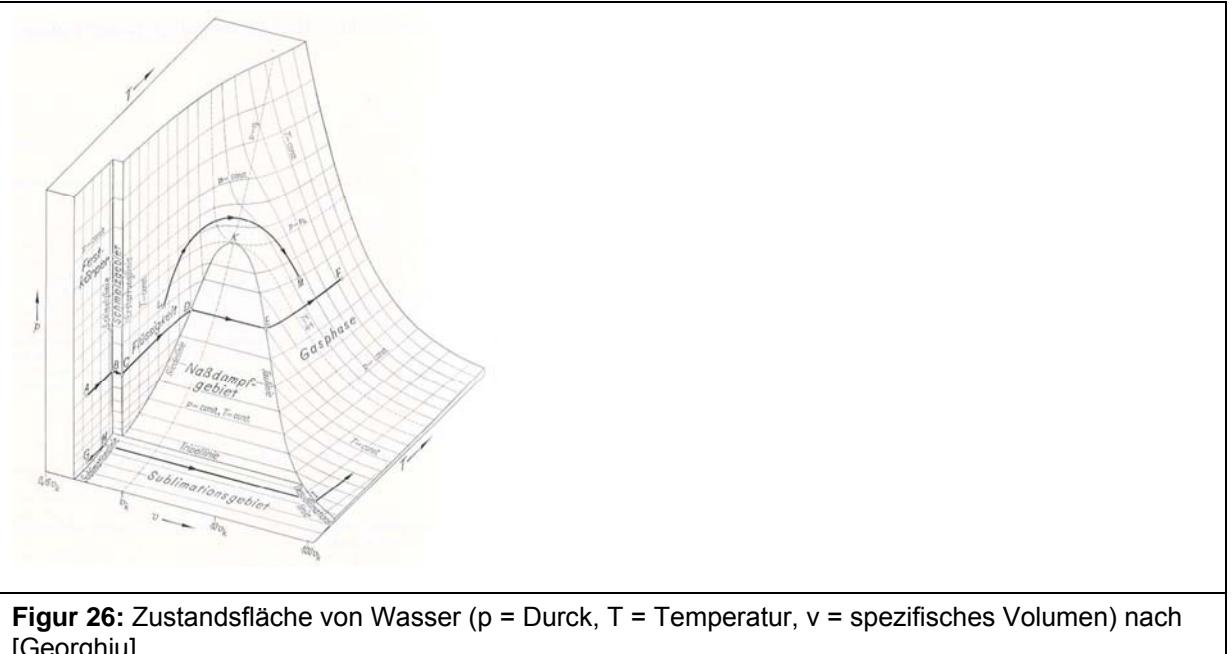
Der idealisierte Stirlingprozess besteht aus zwei isochoren und zwei isothermen Zustandsänderungen eines gasförmigen Arbeitsmediums. In realen Stirlingmaschinen verschiedenster Bauformen werden diese Zustandsänderungen näherungsweise realisiert. Als Arbeitsmedien werden typischerweise Luft, Wasserstoff oder Helium verwendet. Aus Baugründen sowie aus thermodynamischen Gründen werden die Innendrücke von Stirlingmotoren mit mechanischer Leistung im Kilowattbereich recht hoch, entsprechend stellt die Abdichtung eine Herausforderung dar. Das Interview mit einem Spezialisten für Stirlingmotoren [Schneider] lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Hochleistungs-Stirlingmotoren nutzen eine Wärmequelle von rund 1000 °C, das Arbeitsmedium hat eine typische obere Temperatur von 700 °C und eine untere Temperatur von 70 °C. Solche Maschinen erreichen einen Wirkungsgrad von etwa 25%.
- Für eine Wärmequelle von um die 600 °C (wie bei der Abwärmenutzung) müssten die Wärmeübertragungsflächen vergrössert sowie, um die Reibungsverluste zu verkleinern, der Arbeitsdruck abgesenkt werden. Erfahrungen zeigen, dass bei leistungsstarken Stirlingmotoren bei einer oberen Temperatur des Arbeitsmediums zwischen 400-500 °C der Wirkungsgrad auf Null zusammenfällt und die Maschinen stehen bleiben. Würde man einen Stirlingmotor speziell für die Abwärmenutzung bei 600 °C konstruieren, wären mit guten Systemen (z.B. Linear-Stirling Ansätze) schätzungsweise 5% Wirkungsgrad erreichbar.
- Typische Kosten für Stirlingmotoren betragen rund 12'000 CHF/kW_{mech.}, der Wartungsaufwand liegt bei etwa 0.05 CHF/kWh_{mech.}

Aufgrund der tiefen zu erwartenden Wirkungsgraden sowie der hohen zu erwartenden Anlagenkosten scheinen Stirlingmotoren keine geeigneten Maschinen für die exergetische Abwärmenutzung auf einem Temperaturniveau um 600 °C zu sein. Sie sind für wärmegeführte WKK Anlagen mit unterschiedlichen Brennstoffen sowie für solarthermische Anlagen eher geeignet. Detaillierte technische Details zu Stirlingmaschinen sind in [Steimle] zu finden.

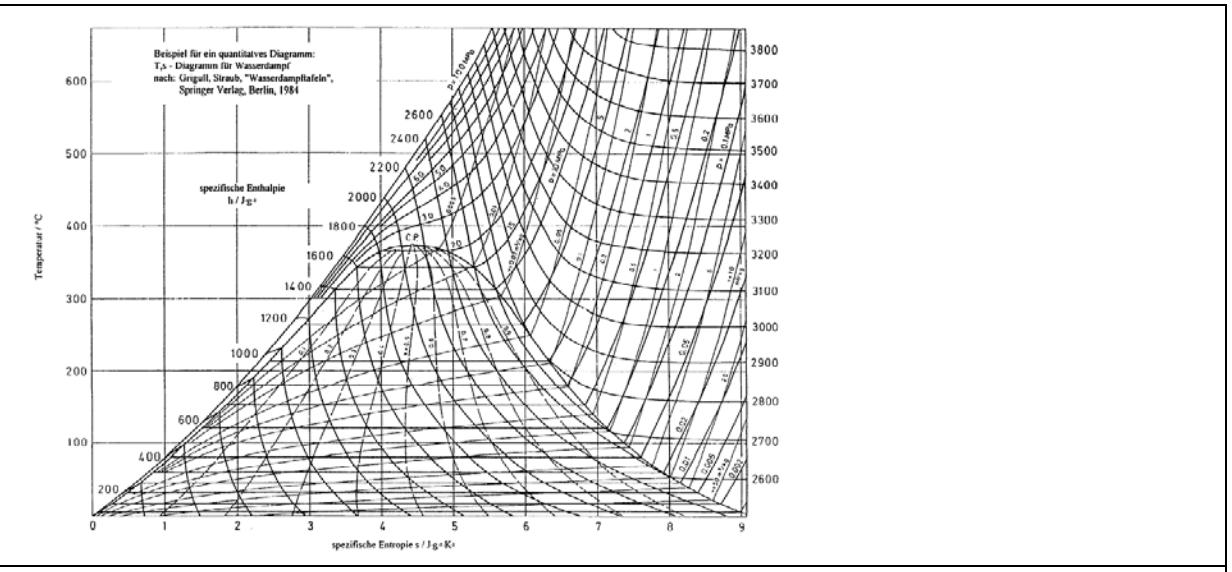
2.2.2 Mehrphasenprozesse

Während Verbrennungsmotoren, Stirlingmotoren mit Gasturbinen die thermische Energie mit Hilfe von Zustandsänderungen eines gasförmigen Arbeitsmediums in mechanische Energie wandeln, nutzen Maschinen mit Mehrphasenprozessen die speziellen Eigenschaften von verschiedenen Phasen des Arbeitsmediums. Typischerweise wird ein Kreisprozess gefahren bei dem das flüssige Arbeitsmedium auf einen hohen Druck gepumpt, erwärmt, verdampft, überhitzt, entspannt und wieder kondensiert wird. Figur 26 stellt eine Zustandsfläche für Wasser dar.



Figur 26: Zustandsfläche von Wasser (p = Druck, T = Temperatur, v = spezifisches Volumen) nach [Georgiu]

In Mehrphasensystemen macht man sich zunutze, dass dem Arbeitsmedium im Zweiphasengebiet (Nassdampfgebiet) isotherm Wärme zugeführt oder entzogen werden kann, in Figur 27 ist ein T,s (Temperatur, spezifische Entropie) Diagramm für Wasser dargestellt.

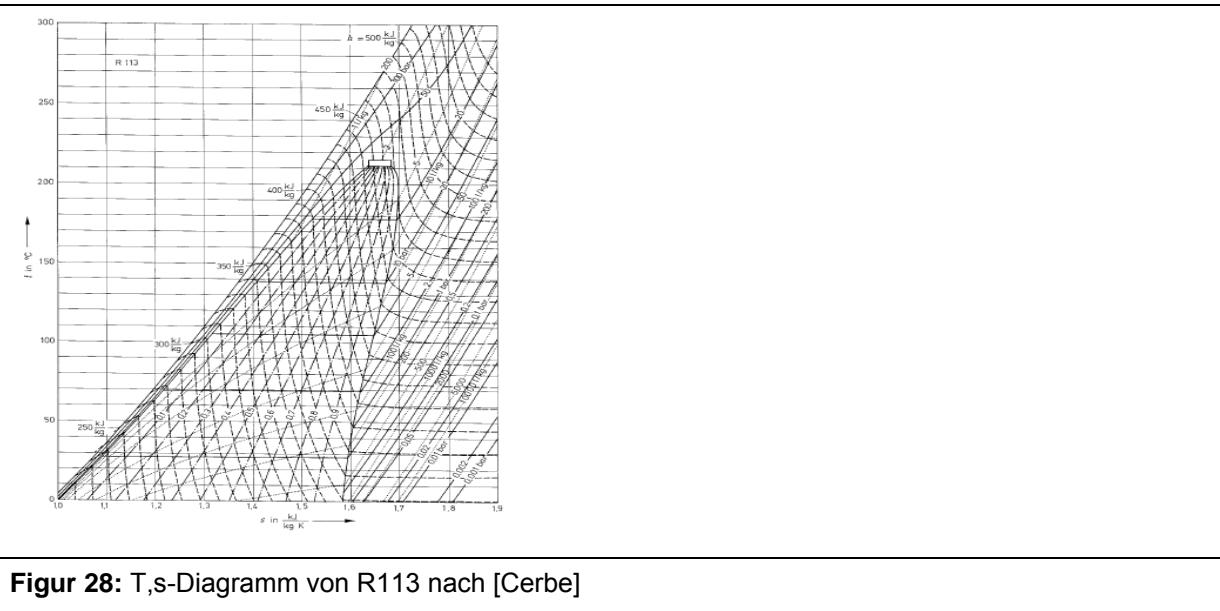


Figur 27: T,s -Diagramm von Wasser

Fährt man nur im Nassdampfgebiet, liesse sich der Carnotprozess (2 Isothermen, 2 Isentropen) in Realität eigentlich sehr gut abbilden. Da die Entspannung in einer wie auch immer gearteter Expansionsmaschine komplett im Nassdampfgebiet stattfinden würde, ist der flüssige Wasseranteil bezüglich Werkstoffen und Schmierung problematisch, zudem würde eine solche Maschine sehr gross. In Realität verlässt man das Nassdampfgebiet in die Gasphase mittels einfacher oder mehrfacher Überhitzung (mit Zwischenkühlung), expandiert nicht oder nur teilweise in das Nassdampfgebiet. Danach wird das Arbeitsmedium komplett kondensiert, denn der Druck eines flüssigen Mediums lässt sich mit sehr kleinem Energieaufwand auf das für die Verdampfung gewünschte Niveau bringen. Aufwändiger Anlagen mit Strömungs-Expansionsmaschinen erhöhen den Wirkungsgrad durch eine sog. Speisewasservorwärmung.

Das Arbeitsmedium hat einen sehr grossen Einfluss auf den Prozess. Einerseits muss es zu den zur Verfügung stehenden Temperaturniveaus und den gewünschten Druckniveaus passen, andererseits

hängt eine Vielzahl von materialtechnischen und tribologischen Fragestellungen mit dem Medium zusammen. Neben Wasser werden organische (z.B. Silikonöl, Ethanol, FCKWs) oder anorganische Arbeitsmedien (z.B. Amoniak) verwendet. Bei Arbeitsprozessen mit organischen Medien spricht man oft von "Organic Rankine Cycle" bzw. von ORC-Systemen. Figur 28 stellt als Beispiel eines (mittlerweile verbotenen bzw. bewilligungspflichtigen) Arbeitsmediums das T,s-Diagramm für R113 ($C_2Cl_3F_3$) dar. Man erkennt die, im Gegensatz zu Wasser, positive Steigung der Sattdampfkurve. Arbeitsmedien mit solchem Verhalten lassen eine Expansion aus dem überhitzten Gebiet zu, ohne in das Zweiphasengebiet zu gelangen.



Figur 28: T,s-Diagramm von R113 nach [Cerbe]

Abwärmenumutzung an Motoren mittels Mehrphasenprozessen zählt in gewissen Bereichen zum Stand der Technik. Bei grossen Schiffsmotoren werden oft sog. Waste-Heat-Recovery (WHR) Anlagen verbaut. Mit der Abgasenthalpie wird eine Nutzturbine angetrieben, zusätzlich wird Dampf erzeugt, welcher eine Dampfturbine antreibt. Bei ohnehin schon sehr effizienten sehr grossen Schiffsmotoren von einigen 10 Megawatt kann an der Nennlast durch solche Systeme über 10% der Wellenleistung zusätzlich gewonnen werden [Wärtsilä]. Um möglichst viel Exergie aus Abwärmeströmen zu gewinnen macht die Aufteilung in mehrere Teilprozesse mit verschiedenen Arbeitsmedien, Druck und Temperaturniveaus Sinn, natürlich steigen damit die Investitionskosten, die Wartungskosten und der Platzbedarf. Auch Automobilhersteller arbeiten mit solchen aufgeteilten Systemen [Freyman]. Bei der Planung der ORC-Systeme ist eine genaue Betrachtung der Temperaturen und der Abgaszusammensetzung erforderlich. Um Ablagerungen und Korrosion an Kesseln und Wärmetauschern zu verhindern kann es notwendig sein, das Abgas nicht unter den Taupunkt von kritischen Bestandteilen abzukühlen. Dadurch kann die für einen ORC-Prozess effektiv nutzbare Temperatur der Abwärmequelle "Motor" reduziert werden.

Im WKK-Bereich sind ORC-Systeme etabliert, meist für die Nutzung von nicht in Verbrennungsmotoren nutzbaren Brennstoffen (z.B. Müllverbrennung, Holzverbrennung), sehr selten für die Abwärmenumutzung bei stromgeführten Biogas WKK-Anlagen. Die Schweizer Firma Komopagas AG befindet sich in der Realisierungsphase von verschiedenen ORC-Systemen, folgende Informationen über zwei verschiedene Anlagentypen wurden freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

1. ORC-System zur Abwärmenumutzung an einer Biomassebefeuerten Heissluft-Mikroturbinenanlage von 100 kW Nennleistung

Der Wirkungsgrad solcher Mikroturbinenanlagen liegt im Bereich von 20% im Gegensatz zu Biogasmotoren mit 35-40% Wirkungsgrad. Der Abwärmestrom in der Luft nach Turbine fällt

bei der Biogas-Mikroturbinenanlage bei lediglich 280 °C an. Das Niedertemperatur ORC System, welche bei Kompogas aufgebaut werden soll, kostet etwa 17'000 CHF/kW_{elektrisch} und wird den elektrischen Wirkungsgrad der Anlage um rund 5 Prozentpunkte verbessern (d.h. von ca. 20% auf ca. 25%).

2. ORC-Anlagen zur Abwärmenutzung von verbrennungsmotorischen Biogas-WKK Anlagen
Solche WKK Anlagen haben, je nach Anlagengrösse, einen elektrischen Wirkungsgrad (unter Berücksichtigung des Eigenverbrauches von Elektrizität) im Bereich von 35-40% und liefern viel heisseres Abgas als Mikroturbinenanlagen. Zu diesen WKK-Anlagen passende einfache Hochtemperatur ORC-Systeme kosten momentan etwa 8'000 CHF/kW_{elektrisch}, der Wirkungsgrad der WKK-Anlagen wird um rund 3 Prozentpunkte verbessert (d.h. von ca. 35-40% auf ca. 38-43%, je nach Anlagengrösse). Mittels komplexerer und teurerer Hoch- und Niedertemperatur ORC-Systeme liesse sich noch deutlich mehr Wärme exergetisch nutzen. Bei Motoren im Bereich um ein Megawatt sind elektrische Wirkungsgrade über 45% technisch machbar.

Der Wartungsaufwand von ORC Systemen beträgt rund 0.04 CHF/kWh_{elektrisch}. Die oben genannten Kosten und Wirkungsgrade beziehen sich auf Anlagen im Bereich über 100 kW thermischer Inputleistung. Kleinere Anlagen dürften pro kW gerechnet teurer und zudem etwas weniger effizient werden.

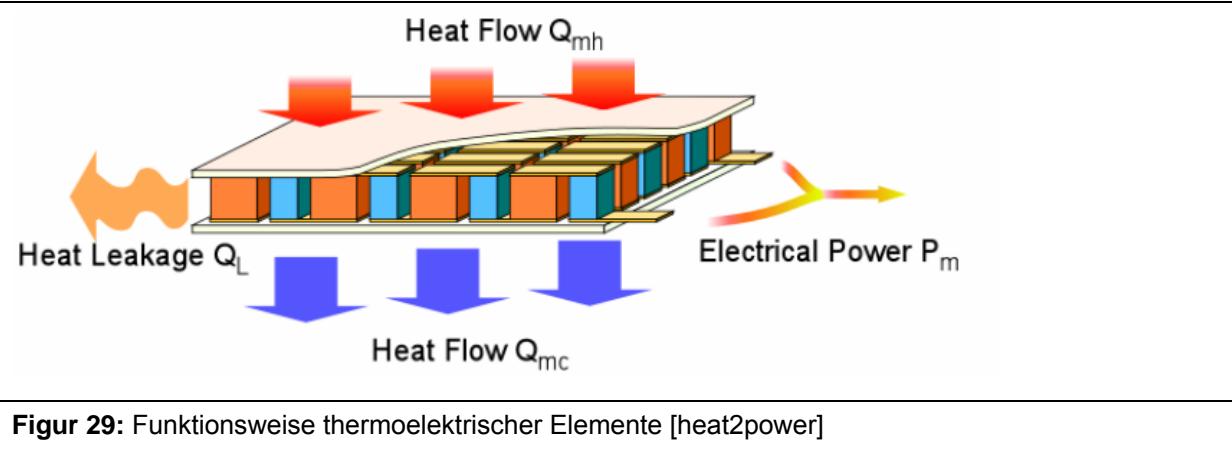
Figur 6 zeigt für eine Einspeisevergütung von 39 Rp./kWh, dass sich Anlagen mit Investitionskosten von 8'000 CHF/kW_{elektrisch} und einer Abschreibungsdauer von 10 Jahren bereits bei Jahreslaufzeiten unter 3'000 Stunden lohnen. Daraus kann gefolgert werden, dass ORC Systeme für die Abwärmenutzung stromgeführter Anlagen ökonomisch und ökologisch sinnvoll sind. Die momentanen Kostenstrukturen fördern klar den Einsatz und die Entwicklung solcher Anlagen.

2.2.3 Thermoelektrische Elemente

Unter dem Begriff der Thermoelektrizität versteht man die direkte Umsetzung eines Wärme- in einen Ladungsstrom durch materialtechnische Effekte.

Der Seebeck – Effekt beschreibt das Phänomen, dass zwischen zwei Punkten eines elektrischen Leiters, die unterschiedliche Temperaturen aufweisen, eine elektrische Spannung entsteht. Dieser Effekt wurde bereits im Jahr 1821 entdeckt und wird heute primär in Form von Thermoelementen zur Temperaturmessung (oder durch Ausnutzung des verwandten Peltier-Effektes) für Kühlzwecke genutzt.

Mit Hilfe des Seebeck – Effekts kann man sogenannte Thermogeneratoren herstellen, mit denen es möglich ist Wärmeströme in nutzbare elektrische Energie zu wandeln. In Figur 29 ist schematisch der Aufbau eines Thermogenerators dargestellt. Die Effizienz der Umwandlung von Wärmeströmen in Elektrizität ist materialabhängig und liegt aktuell bei käuflich erwerbbaren Thermogeneratoren am Auslegungspunkt bei 3 – 8%. Die Möglichkeit der Abwärmenutzung mit solchen Elementen wird in der Automobil- und Motorenindustrie aktiv verfolgt (z.B. [NZZ]).



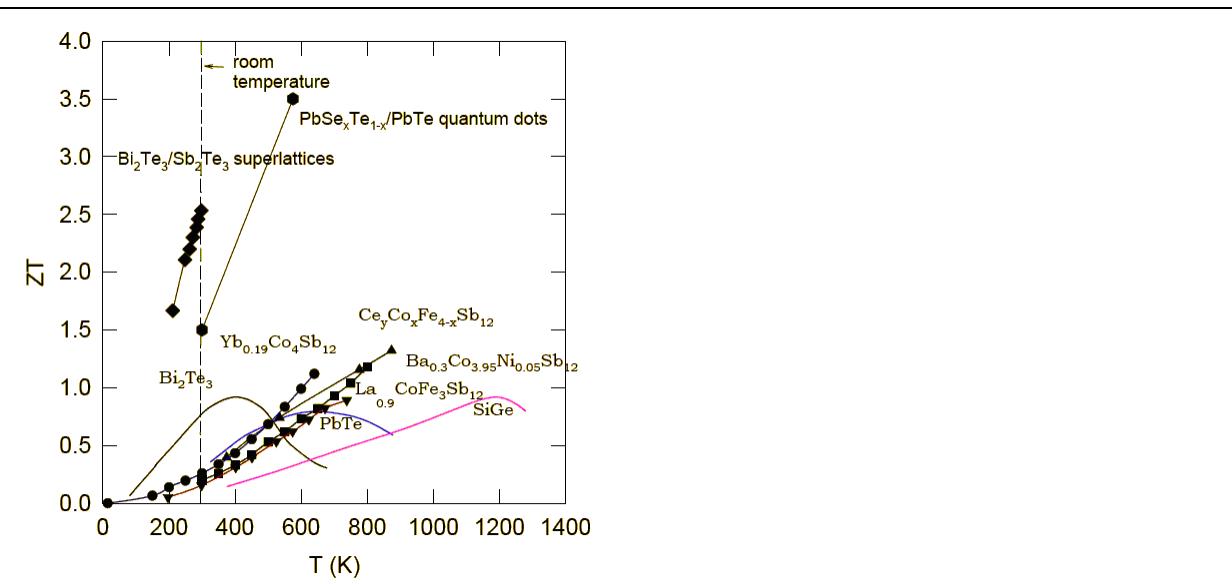
Anhand der Wirkungsgradberechnungsformel ist ersichtlich, dass ausschliesslich der materialabhängige Faktor **ZT** und die Temperaturen auf der heissen- (TH) und kalten Seite (TC) des Thermogenerators massgebend für den Wirkungsgrad der thermoelektrischen Elemente ist.

$$\eta = \frac{T_H - T_C}{T_H} \frac{\sqrt{1+ZT} - 1}{\sqrt{1+ZT} + \frac{T_C}{T_H}} \quad (2)$$

Für **ZT** gegen Unendlich resultiert der Carnot-Wirkungsgrad.

Die aktuelle Entwicklung der Thermogeneratoren bzw. Thermogeneratormaterialien hat zum Ziel die Temperaturfestigkeit zu erhöhen um die Elemente auch bei Temperaturen bis zu 1000°C einsatzfähig zu machen, den materialabhängigen Faktor **ZT** zu erhöhen und auch den Formfaktor der Generatoren zu miniaturisieren.

Figur 30 zeigt eine Darstellung des Faktors **ZT** für unterschiedlich Materialien und Temperaturen.



Figur 30: ZT – Werte unterschiedlicher Materialien [heat2power]

2.2.3.1 Thermoelektrische Elemente aktueller Bauart

Die aktuell am Markt erhältlichen Thermogeneratoren basieren grösstenteils auf dem Material Bi₂Te₃ (Bismuttellurid). Die Nachteile dieses Materials sind die nur geringe Temperaturfestigkeit (< 250°C) und die relativ hohen Kosten für die darauf basierenden Thermogeneratoren ($\approx 4 - 5 \text{ €/W}$). Ein weiterer Nachteil ist die Toxizität des Legierungsbestandteils Te (Tellur).

Aufgrund der oben beschriebenen relativ niedrigen Temperaturfestigkeit bieten sich die Bi₂Te₃ basierten Thermogeneratoren zur Nutzung der Abwärme in den niedrig Temperaturkreisläufen (Öl- und Kühlwasserkreislauf) eines Verbrennungsmotors an. Das zur Verfügung stehende Temperaturniveau in diesen Kreisläufen liegt bei ca. 80 – 120 °C. Es wäre ebenfalls denkbar diese Elemente in Bereichen der Abgasanlage einzusetzen in denen das Temperaturniveau unterhalb von 250° C liegt (z.B. in Schalldämpfernähe).

Beispielhaft sind in Tabelle 5 Prospektangaben geeigneter Thermogeneratoren abgebildet. Die in der Tabelle angegebenen Werte gelten für eine Betriebstemperatur von TH = 120°C und eine Temperaturdifferenz von $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ und sind somit sehr nahe an den Werten die in den Niedrigtemperaturkreisläufen eines Verbrennungsmotors vorhanden sind.

Bezeichnung	Leerlaufspannung [V]	Kurzschlussstrom [A]	Maximale Leistung [W]	Größe L x B x H [mm]	Stückpreis 1+ [Euro]	Stückpreis 10+ [Euro]	Stückpreis 100+ [Euro]
TEG1-9.1-9.9-0.2/100	2,7	0,3	0,2	9,1 x 9,9 x 2,3	69,95	58,45	31,05
TEG1-30-30-2.1/100	5,4	1,6	2,1	30,0 x 30,0 x 3,6	34,95	29,25	16,15
TEG1-40-40-4.0/100 (s)	10,4	1,6	4,0	40,0 x 40,0 x 3,6	60,95	50,95	25,45
TEG1-40-40-4.0/100 (p)	5,2	3,1					
TEG1-40-40-4.7/100	5,4	3,5	4,7	40,0 x 40,0 x 3,4	51,95	43,30	23,20
TEG2-40-40-4.7/100	5,3	3,5	4,7	40,0 x 40,0 x 3,4	17,95	14,95	8,30
TEG1-40-40-10/100	8,2	4,9	10,1	40,0 x 40,0 x 3,2	97,65	81,40	38,65

Tabelle 5: Geeignete Thermogeneratoren für die Öl- und Wasserkreisläufe [Eureca]

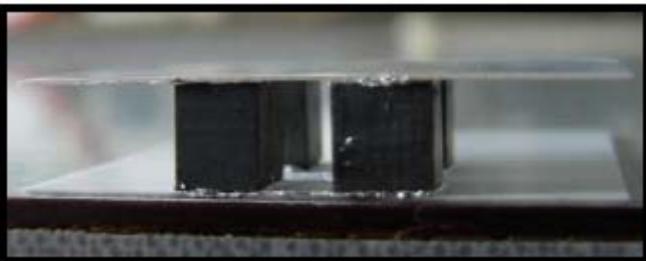
Zur Erreichung der nötigen Temperaturdifferenz ist es unumgänglich einen zusätzlichen entsprechend dimensionierten Niedertemperaturkühlkreislauf zu installieren oder, falls dieser bereits zur Ladeluftkühlung vorhanden ist, entsprechend neu zu dimensionieren. Dies sollte bei stationären BHKW's aufgrund der kaum beschränkten Platzverhältnisse problemlos möglich sein. Es soll an dieser Stelle noch erwähnt werden, dass im Rahmen von Messungen die an der Empa durchgeführt wurden, die Prospektangaben eines Herstellers bezüglich Leistungsabgabe nicht nachvollzogen werden konnten, die real erreichbaren Werte waren deutlich tiefer. Aus diesem Grund ist bei einer eventuellen Beschaffung entsprechender Thermogeneratoren unbedingt darauf zu achten, dass die Leistungsangaben vom Hersteller garantiert werden.

2.2.3.2 Neue Generation thermoelektrischer Elemente

Wie bereits in Kapitel 2.2.3.1 beschrieben, sind aktuell erhältliche Thermogeneratoren nur bis zu einer Temperatur von ca. 250°C einsetzbar und daher nicht geeignet um die Wärmestrome, die im Abgas eines Verbrennungsmotors bei deutlich höherer Temperatur anfallen, direkt energetisch zu nutzen. Natürlich liesse sich der Abgaswärmestrom durch Kühlung oder durch einen schlecht isolierten Zwischenkreis auf ein für solche Thermoelemente geeignetes Temperaturniveau bringen, damit würde man aber den Abgaswärmestrom exergetisch entwerten, d.h. die erreichbare Umwandlungseffizienz des Wärmestromes würde stark abnehmen.

An der EMPA werden Thermogeneratoren auf Basis von Metalloxidlegierungen entwickelt [Weidenkaff]. Zur Zeit werden erste Prototypen getestet und zeigen bereits beachtliche Ergebnisse. Diese bieten den grossen Vorteil bis zu Temperaturen von über 600°C einsetzbar zu sein und sind damit problemlos im Abgasstrang eines Verbrennungsmotors applizierbar.

Aufgrund der im Vergleich zu Bi_2Te_3 sehr günstigen Rohmaterialpreise von Metalloxidlegierungen, sollten die Kosten für diese neuen Elemente, bei Herstellung nennenswerter Stückzahlen, deutlich unterhalb der aktuell erhältlichen liegen. Die Figur 31 zeigt einen der ersten Prototypen.

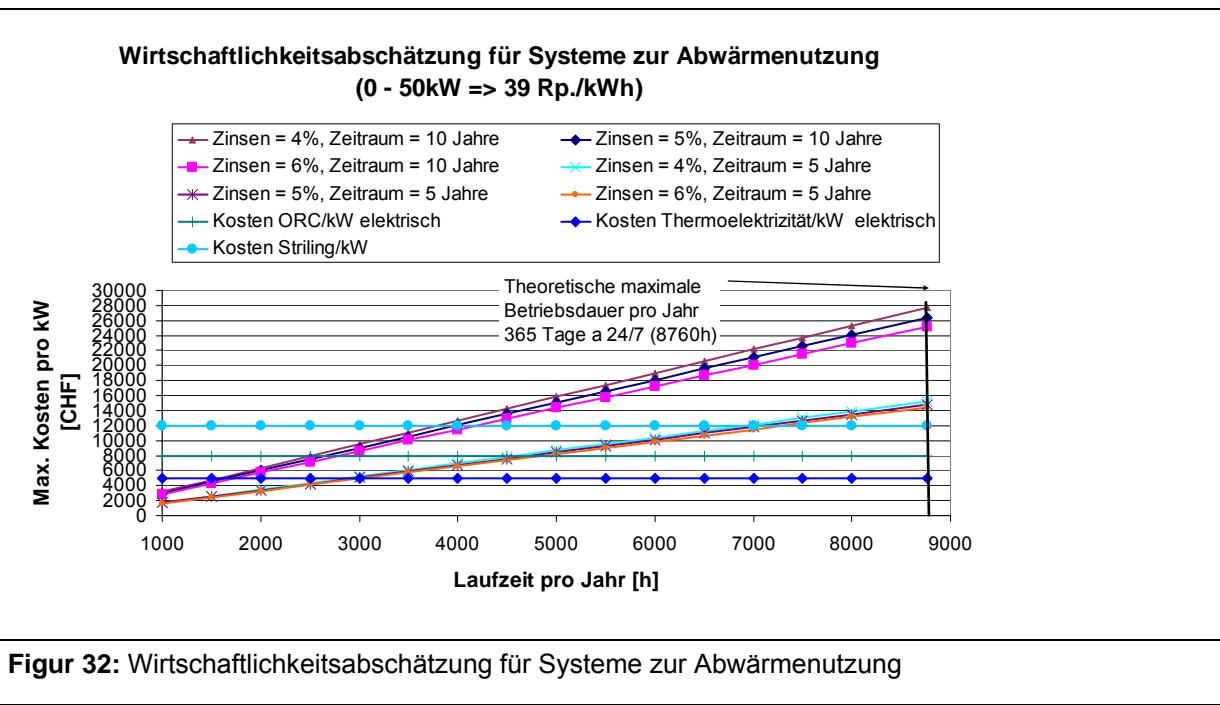


Figur 31: Prototyp neuartiger Thermogeneratoren (Bild: Empa Abteilung Festkörperchemie und Katalyse)

3. Wirtschaftlichkeitsabschätzung der einzelnen Systeme zur Abwärmenutzung

An dieser Stelle werden die Möglichkeiten zur Wirkungsgradsteigerung von BHKW's nochmals kurz bezüglich Ihrer Wirtschaftlichkeit zusammengefasst dargestellt. Im Rahmen dieses Projekts werden keine exakten anlagenspezifischen Kalkulationen durchgeführt, vielmehr sollen die verschiedenen einsetzbaren Technologien bezüglich Ihrer Kosten pro kWh miteinander verglichen werden. Der Wirkungsgrad der einzelnen Systeme ist zumindest bei den Technologien zur Abwärmenutzung eher von untergeordneter Bedeutung, da hier „Verluste“ genutzt werden und damit die Kosten pro kWh in den Vordergrund treten.

Das in Figur 32 dargestellte Diagramm entspricht dem am Anfang dieses Berichts dargestellten Figur 6 jedoch mit integrierten Kosten für die untersuchten Systeme.



Die hier angesetzten Kosten der jeweiligen Technologien sind ohne Wartungsaufwand kalkuliert. Dieser ist im Vergleich zu den Anschaffungskosten jedoch schon fast vernachlässigbar, weitere eventuelle Kosten wie z.B. Platzbedarf und damit Gebäudefläche sind sehr schwer allgemein erfassbar.

und müssen anlagenspezifisch berechnet werden. Weiterhin sind für die Thermoelektrizität keine Kosten für die benötigte Leistungselektronik zum Einspeisen in das Netz enthalten. Diese müssten noch evaluiert werden.

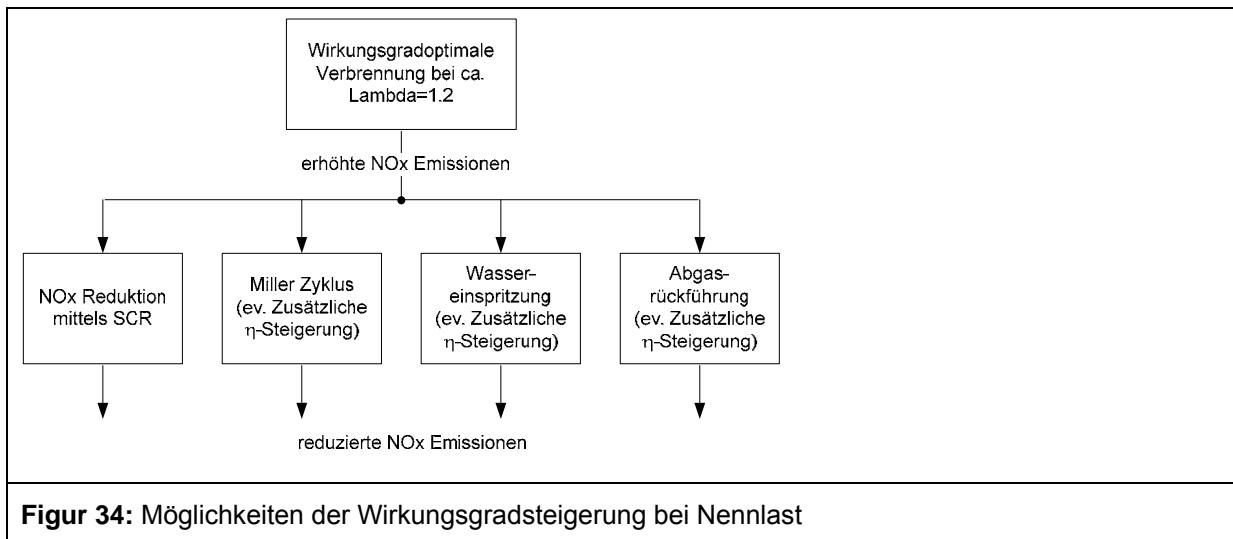
4. Diskussion und Schlussfolgerungen

Abhängig von der Jahresbetriebszeit, der Jahresstromproduktion, der Amortisationsdauer und der angenommenen Kapitalkosten ermöglicht der aktuelle Einspeisevergütungstarif den Einsatz recht kostenintensiver Massnahmen zur Wirkungsgradsteigerung von Biogas WKK Anlagen. Als Möglichkeiten, die elektrische Ausbeute zu steigern, ergibt sich einerseits die Steigerung des verbrennungsmotorischen Wirkungsgrades und andererseits die Wandlung der Abwärme in elektrische Energie. Da die bei WKK Anlagen etablierte Wandlung von mechanischer in elektrische Energie mittels Synchronmotoren sehr effizient ist und nur sehr kleines Optimierungspotenzial hat, wurde der Pfad der elektrischen Wandlung hier nicht verfolgt.

Auf der Seite der Wirkungsgradsteigerung von Biogasmotoren gibt es zwei wichtige Pfade:

- Der Wirkungsgrad sollte bei Nennlastbetrieb gesteigert werden.
- Da Biogas WKK Anlagen oft im Teillastbetrieb gefahren werden sollte der Teillastwirkungsgrad gesteigert werden.

Figur 34 stellt die vorgeschlagenen Massnahmen zur Wirkungsgradsteigerung im Nennlastbetrieb dar. Die Potenziale der einzelnen Massnahmen sind aufgrund der Komplexität des Prozesses und der wenig erforschten verbrennungsmotorischen Eigenschaften von unaufbereitetem Biogas weder durch theoretische Überlegungen noch durch Literaturstudium klar quantifizierbar. Es ist auch unklar, inwie weit sich diese Massnahmen gewinnbringend kombinieren lassen da viele auf eine NO_x-mindernde Spitzentemperaturabsenkung zielen. Es ist durchaus denkbar, dass ein Motor mit Millerprozess, Wassereinspritzung und Abgasrückführung ein gangbarer Weg ist. Hier besteht noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf.



Die Tatsache, dass der Biogasanfall oftmals sehr stark schwankt und die nachgeschaltete WKK Anlage diesem Biogasanfall folgen muss, misst dem Teillastwirkungsgrad des Verbrennungsmotors eine recht hohe Bedeutung zu. Dimensioniert man eine WKK Anlage auf den durchschnittlichen Biogasanfall so läuft man in Gefahr, dass bei höherem Anfall der Überschuss im besseren Fall abgefeckelt und im schlechteren Fall abgeblasen wird. Es ist also sinnvoll, die WKK Anlage so zu dimensionieren, dass sie den maximalen Anfall abnehmen kann oder aber einen genügend grossen Zwischen speicher vorzusehen und die WKK Anlage gemäss Biogasanfall getaktet an der Nennlast zu betreiben.

Der getaktete Betrieb hat den Vorteil, dass die WKK Anlage stets im Punkt mit bestem Wirkungsgrad läuft sowie die Jahreslaufzeit reduziert wird, dies reduziert auch den Wartungsaufwand. Der Nachteil ist natürlich, dass ein Zwischenspeicher für das Gas und evtl. auch für die Wärme notwendig wird.

Geht man den Weg, die WKK Anlage auf den maximalen Biogasanfall zu dimensionieren, gewinnt der Teillastwirkungsgrad stark an Bedeutung. Normalerweise wird bei Gasmotoren die Last eingestellt, indem man die Dichte der Ansaugluft via Druckabsenkung (Drosselung) verändert. Dieses Verfahren lässt sehr schnelle Laständerungen zu, ist aber stark verlustbehaftet. Da schnelle Laständerungen im WKK Betrieb nicht von Bedeutung sind, ist die alternative Methode der Dichteabsenkung durch Ansaugluftvorwärmung ein vielversprechender Ansatz, den es sich zu verfolgen lohnen würde da er einen Nutzen bei sehr tiefen Kosten bringen könnte. Einige der oben beschriebenen Wirkungsgrad-steigernden Massnahmen helfen ebenfalls, die Drosselverluste im Teillastbetrieb zu verringern (Miller Zyklus, Abgasrückführung). Um die Potentiale für den hier diskutierten Einsatz zu quantifizieren würde sich eine systematische experimentelle Untersuchung der in Figur 34 beschriebenen Massnahmen zusammen mit Ansauglufttemperaturerhöhung im Teillastbetrieb lohnen.

Auf der Seite der Wandlung der Abwärme in elektrische Energie gibt es ebenfalls vielversprechende Pfade. Als bei Grossanlagen etablierte Methode mit kleinem technologischem Risiko stellt sich die Abwärmenutzung mittels ORC Systemen dar. Die durch kostendeckende Einspeisevergütungen hervorgerufene Nachfrage nach solchen kleineren ORC Systemen wird die Bereitstellung dieser Technologie seitens der Industrie fördern. Auf den ersten Blick scheinen Stirlingmaschinen ebenfalls für die Aufgabe der Abwärmeeverstromung geeignet zu sein. Bei genauerer Betrachtung zeigen sie bzgl. Wartungsaufwand, Wirkungsgrad und Kosten Nachteile gegenüber ORC Systemen.

Als interessante Alternative der Abwärmenutzung stellt sich die Thermoelektrizität dar. Die heute verfügbare, auf Telluriden basierende Technologie wird vermutlich, aufgrund von Temperaturlimitierungen und der Toxizität der Materialien, keinen sinnvollen Einsatz ermöglichen. Die Fortschritte in der Forschung auf dem Gebiet neuer, temperaturstabilerer, deutlich kostengünstigerer thermoelektrischer Wandler versprechen allerdings, dass in naher Zukunft solche Elemente für die Abwärmenutzung von Verbrennungsmotoren im Kühlkreis und/oder im Abgas an Bedeutung gewinnen könnten.

Referenzen

- [Bertola] Bertola A. Technologies for lowest NOx and particulate emissions in DI-Diesel engine combustion – influence of injection parameters, EGR and Fuel Composition, Dissertation ETH No. 15373, 2003.
- [Cerbe] Cerbe G, Hoffman H. Einführung in die Wärmelehre. Fachbuchverlag Leipzig, 2002.
- [Eureca] Eureca Messtechnik GmbH <http://eureca.de>
- [Freyman] Freyman R., Strobl, W., Obieglo, A. Der Turbosteamer: Ein System zur Kraft-Wärme-Kopplung im Automobil. Motortechnische Zeitschrift MTZ 2008:05:404-412.
- [Georghiou] Georghiou V. Vorlesungsskript Technische Thermodynamik und Strömungslehre, HAW Hamburg, Fakultät Technik und Informatik (TI), Department Maschinenbau und Produktion (MP), 2006.
- [heat2power] <http://www.heat2power.net> Informationsseite zur Abwärmenutzung
- [Herdin] Herdin G. Gasmotoren Grundlagen. Vorlesungsunterlagen des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz, 2008.
- [Hitomi] Hitomi M. et. al. Mechanism of improving fuel efficiency by Miller cycle and its future prospect, SAE Paper 950974, 1995.
- [LRV] Luftreinhalte – Verordnung (Stand 1.September 2007)
- [Miller 1] Miller R. H. Supercharging and internal cooling cycle for high output. Transactions of ASME 1947:69:453-457.
- [Miller 2] Miller R.H., Liebherr, H.U. The Miller supercharging system for diesel and gas engines operating characteristics, proceedings of the 4th international congress on combustion engines, Zürich, June 15-22, 1957.
- [Nellen1] Nellen C, Boulouchos K: Natural Gas Engines for Cogeneration: Highest Efficiency and Near-Zero-Emissions through Turbocharging, EGR and 3-Way Catalytic Converter, SAE Paper, 2000-01-2825, 2000.
- [Nellen2] [2] Nellen C, Boulouchos K. Aufgeladene Gasmotoren mit AGR und Dreiwege-Katalysator - der Weg zu niedrigsten Emissionen bei hohem Wirkungsgrad und grosser Leistungsdichte. MTZ Motortechnische Zeitschrift 61 (2000) 1.
- [NZZ] Elektrischer Strom aus Wärmeenergie der Abgase, NZZ Magazin / Auto-Mobil 20. Mai 2008.
- [Oettli] Oettli B et. al. Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz, Studie im Auftrag des Forschungsprogrammes "Energiewirtschaftliche Grundlagen" des Bundesamtes für Energie, 2004.
- [Pischinger] Pischinger, Kllel, Sams: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine, Springer, 2002.
- [Ronney] Ronney P, Shoda M, Waida S, Durbin E. Throttleless premixed-charge engines: concept and experiment. Proc Instn Mech Engrs 1994:208:13-14.
- [Schneider] Interview vom 01.02.2008 mit Gabriel Schneider, Stirling Systems AG, Industrieplatz 1, CH-8212 Neuhausen am Rheinfall

[Schutting] Schutting E. et. al. Miller- und Atkinson-Zyklus am aufgeladenen Dieselmotor. Motortechnische Zeitschrift MTZ 2007:06:480-485.

[Shimogata] Shimogata S. et al. Study on Miller cycle gas engine for co-generation systems – numerical analysis for improvement of efficiency and power. SAE Paper 971709, 1997.

[Steimle] Steimle F, Lamprichs J, Beck P. Stirling-Maschinen-Technik, Grundlagen, Konzepte, Entwicklungen, Anwendungen. C. F. Müller Verlag, 2007.

[StromVV] Schweizer Stromversorgungsverordnung vom 14. März 2008 (verfügbar unter <http://www.admin.ch/ch/d/as/2008/1223.pdf>)

[Tschalamoff1] Tschalamoff T. et al. Auswirkungen von Wassereinspritzung auf den Betrieb eines Ottogasmotors. 5. Dessauer Gasmotorenkonferenz, 29.-30. März, 2007

[Tschalamoff2] Tschalamoff T. Abgasrückführung im mittelschnell laufenden Gasmotor. Motortechnische Zeitschrift MTZ 2004-11, 2004.

[van Basshuysen] van Basshuysen/Schaefer: Handbuch Verbrennungsmotoren

[Vormstein] Vormstein H, Stellwagen K. TCG 2020 V20 neuer Hochleistungs – Gasmotor für Containereinsätze, 3. Dessauer Gasmotoren-Konferenz, 22. und 23. Mai 2003.

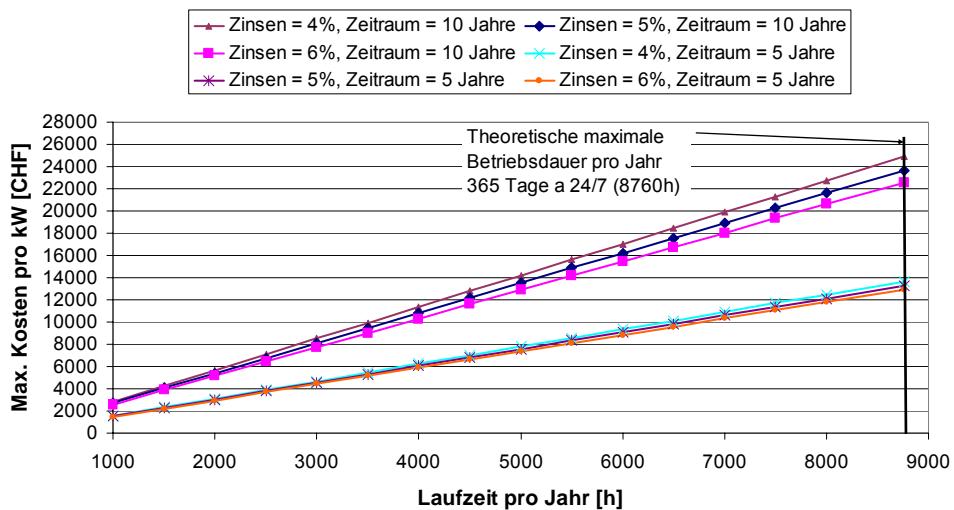
[Warnatz] Warnatz J, Maas U, Dibble R. Verbrennung; Physikalisch Chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstoffentstehung. Springer Verlag, 2001.

[Wärtsila] Wärtsilä RTflex96C AND Wärtsilä RTA96C technology review

[Weidenkaff] Weidenkaff A. Erstellen und Modellierung eines thermoelektrischen oxidischen Moduls (TOM) als Demonstrator, Publikation 270122, BfE, 2007 (verfügbar unter www.bfe.admin.ch/dokumentation/energieforschung/index.html).

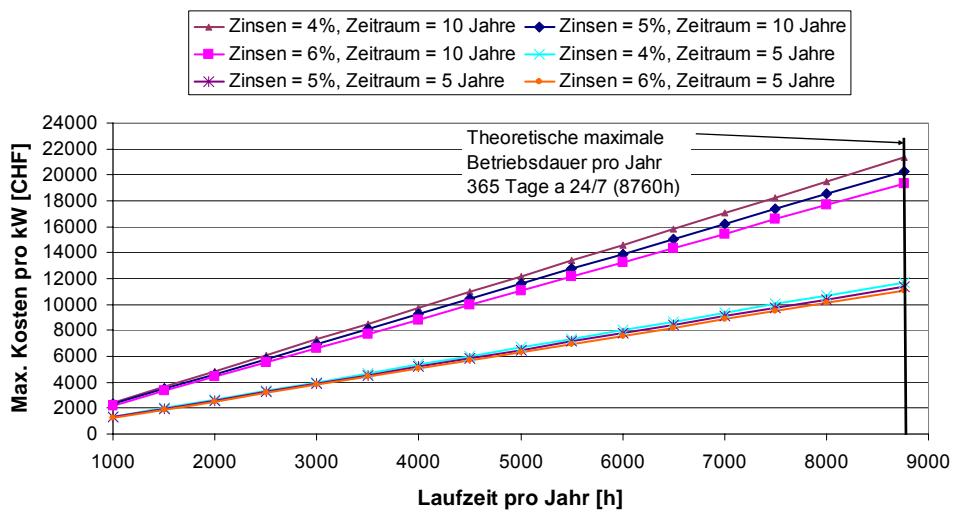
Anhang

Wieviel darf 1 kW maximal Kosten? (51 - 100kW => 35 Rp./kWh)



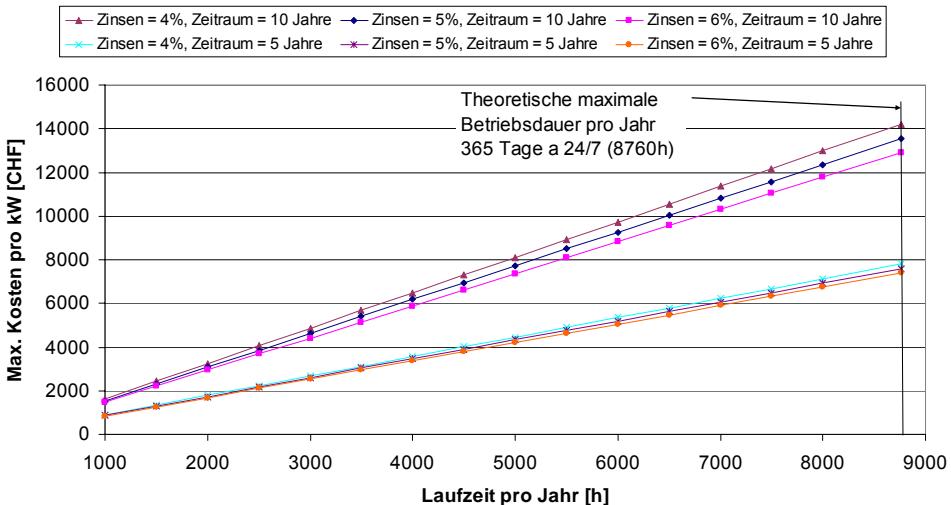
Maximalkosten pro kWh s. Seite 11 Figur 6

Wieviel darf 1 kW maximal Kosten? (101 - 500kW => 30 Rp./kWh)



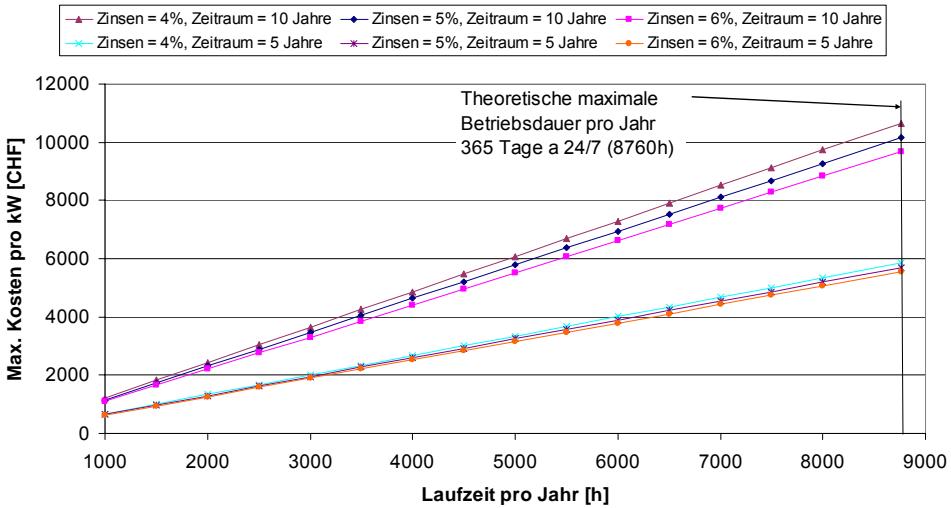
Maximalkosten pro kWh s. Seite 11 Figur 6

Wieviel darf 1 kW maximal Kosten? (501 - 5000kW => 20 Rp./kWh)



Maximalkosten pro kWh s. Seite 11 Figur 6

Wieviel darf 1 kW maximal Kosten? (> 5000kW => 15 Rp./kWh)



Maximalkosten pro kWh s. Seite 11 Figur 6

Berechnung der maximal zulässigen Kosten pro kW elektrisch

Im der folgenden Berechnung wird beispielhaft dargestellt, wie die maximale Investitionssumme pro kWh berechnet wurde.

Die Annuität ist eine regelmäßig jährlich fließende Zahlung, die sich aus den Elementen Zins und Tilgung zusammensetzt. In der Finanzmathematik ist die Annuität ein gebräuchlicher Begriff und soll an dieser Stelle nicht weiter erklärt werden.

Zur Berechnung der maximal zulässigen Kosten pro kWh werden folgende Annahmen benötigt:

1. Der Abschreibungszeitraum => Zeitraum nachdem der Ertrag die Investition amortisiert hat
2. Der Ertrag pro Jahr der mit einem kW elektrischer Leistung erwirtschaftet werden kann. Wie in Figur 6 dargestellt, ist dies natürlich von der Laufzeit des BHKW abhängig. Dieser Betrag entspricht in der Rechnung der Annuität. Da der Ertrag voll zur Investitionstilgung verwendet wird.
3. Der Zinssatz der Investition

Berechnung des jährlichen Ertrags:

$$t_{\text{Lauf}} := 5000 \quad \text{Jährliche Laufzeit des BHKW [h]}$$

$$\text{Tarif} := 0.2 \quad \text{Einspeisevergütung [CHF/kWh]} \Rightarrow 501 - 5000 \text{ kW}$$

$$P_{\text{elektr}} := 1 \quad \text{Elektrische Leistung [kW]} \Rightarrow \text{Bezug auf ein kW}$$

Berechnung der jährlichen Strommenge:

$$W_{\text{elektr}} := t_{\text{Lauf}} \cdot P_{\text{elektr}} \quad W_{\text{elektr}} = 5 \cdot 10^3 \text{ kWh}$$

Berechnung des jährlichen Ertrags:

$$\text{Ertrag} := W_{\text{elektr}} \cdot \text{Tarif} \quad \text{Ertrag} = 1 \cdot 10^3 \text{ [CHF]}$$

Berechnung der maximal möglichen Investitionssumme::

Abschreibungszeitraum := 10 Zeitraum in Jahren, über den die Investition amortisiert werden soll

Annuität := 1000 Entspricht in diesem Fall dem jährlich erzielbaren Ertrag in CHF
=> Ergibt sich aus der jährlichen Betriebsdauer und dem jeweiligen
Einspeisevergütungssatz in CHF/kWh. Der dargestellte Betrag
entspricht dem Erlös bei einer jährlichen Laufleistung von 5000h
und einer Einspeisevergütung von 20 Rp./kWh

Zinsen := 0.04 Zinssatz als Absolutwert

$$\text{Investitionssumme} := \frac{\text{Annuität} \cdot [(1 + \text{Zinsen})^{\text{Abschreibungszeitraum}} - 1]}{(1 + \text{Zinsen})^{\text{Abschreibungszeitraum}} \cdot \text{Zinsen}}$$
$$\text{Investitionssumme} = 8.111 \cdot 10^3 \text{ [CHF]}$$

Berechnung der maximal zulässigen Kosten pro kW elektrisch Seite 1 von 2 (Berechnungsgrundlage der Figur 6)

Die Investitionssumme entspricht hierbei der maximalen Summe, die ein kW elektrische Leistung, inkl. aller Nebenkosten während des Abschreibungszeitraums kosten darf, um nach dem oben angegebenen Abschreibungszeitraum amortisiert zu sein.

Investitionsverhältniss (Um welchen Faktor darf die Investitionssumme über dem Ertrag liegen?):

$$\text{Invest}_{\text{ratio}} := \frac{\text{Investitionssumme}}{\text{Ertrag}}$$

$$\text{Invest}_{\text{ratio}} = 8.111$$

In diesem Beispiel darf die Investitionssumme den Ertrag maximal um den Faktor 8.111 übersteigen.

Berechnung der maximal zulässigen Kosten pro kW elektrisch Seite 2 von 2 (Berechnungsgrundlage der Figur 6)

Wirtschaftlichkeitsverlust durch Teillastbetrieb und Wirtschaftlichkeit durch Lambdaoptimierung

Folgend wird der Berechnungsweg aufgezeigt, aus dem der Ertragsverlust durch Teillastbetrieb eines BHKW bestimmt wurde und der Ertragsvorteil eines lambdaoptimalen Betriebs des BHKW aufgezeigt wird (s. Kap. 2.1.1 bzw. 2.1.2).

Annahme:

Biogasmenge := 195000[Nm³/Jahr]

Teillastanteil:= 10 [%/Jahr]

Daten:

Vollastleistung:=144.03 [kW]

Teillastleistung:=85.16 [kW]

Vollastverbrauch:=65.89 [Nm³/h]

Teillastverbrauch:=42.52 [Nm³/h]

Lambdaoptimaler Verbrauch:=64.40 [Nm³/h]

Harnstoffkosten := 0.44 [CHF/l]

Harnstoffverbrauch := 2.22 [l/h]

Vergütung kWh := 0.3 [CHF/kWh]

Anschaffungskosten_{SCRSystem} := 27000 [CHF]

Berechnung der jährlichen Betriebsdauer => Ergibt sich aus der Biogasmenge und den jeweiligen Voll- und Teillastverbräuchen, sowie dem Voll- und Teillastanteil pro Jahr

$$T_{\text{Betrieb}} := \frac{\text{Biogasmenge}}{\frac{(100 - \text{Teillastanteil})}{100} \cdot \text{Vollastverbrauch} + \frac{\text{Teillastanteil}}{100} \cdot \text{Teillastverbrauch}}$$

$$T_{\text{Betrieb}} = 3.068 \cdot 10^3 [\text{h/Jahr}]$$

$$T_{\text{BetriebLambdaoptimal}} := \frac{\text{Biogasmenge}}{\text{Lambdaoptimaler Verbrauch}}$$

$$T_{\text{BetriebLambdaoptimal}} = 3.028 \cdot 10^3 [\text{h/Jahr}]$$

Berechnung der Produktionsmenge

$$W_{\text{Gesamt}} := \left[\frac{(100 - \text{Teillastanteil})}{100} \cdot \text{Vollastleistung} + \frac{\text{Teillastanteil}}{100} \cdot \text{Teillastleistung} \right] T_{\text{Betrieb}}$$

$$W_{\text{Gesamt}} = 4.239 \cdot 10^5 [\text{kWh}]$$

Berechnungsweg lambdaoptimaler Betrieb und Teillastbetrieb(s.Kap. 2.1.1 und 2.1.2) Seite 1 von 2

Berechnung der Produktionsmenge bei Lambdaoptimiertem Betrieb

$$W_{\text{Lambdaoptimiert}} := \text{Vollastleistung} \cdot T_{\text{BetriebLambdaoptimiert}}$$

$$W_{\text{Lambdaoptimiert}} = 4.361 \cdot 10^5 [\text{kWh}]$$

Harnstoffkosten für lambdaoptimierten Betrieb

$$\text{Harnstoffkosten} := T_{\text{BetriebLambdaoptimiert}} \cdot \text{Harnstoffkosten} \cdot \text{Harnstoffverbrauch}$$

$$\text{Harnstoffkosten} = 2.958 \cdot 10^3 \quad [\text{CHF/Jahr}]$$

+

Umsatzsteigerung durch lambdaoptimierten Betrieb

$$\text{Umsatzsteigerung} := (W_{\text{Lambdaoptimiert}} - W_{\text{Gesamt}}) \cdot \text{Vergütung kWh} - \text{Harnstoffkosten}$$

$$\text{Umsatzsteigerung} = 717.538 [\text{CHF/Jahr}]$$

Abschreibungskosten SCR System (10 Jahre, 4% Zinsen)

$$\text{Annuität}_{\text{SCR}} := \frac{\text{Anschaffungskosten}_{\text{SCRSsystem}} \cdot (1 + 0.04)^{10} \cdot 0.04}{[(1 + 0.04)^{10} - 1]}$$

$$\text{Annuität}_{\text{SCR}} = 3.329 \cdot 10^3 \quad [\text{CHF}]$$

Berechnungsweg lambdaoptimierter Betrieb und Teillastbetrieb(s.Kap. 2.1.1 und 2.1.2) Seite 2 von 2